

BAUHAUS - UNIVERSITÄT WEIMAR

**FAKULTÄT BAUINGENIEURWESEN
INSTITUT FÜR WASSERWESEN
LEHRSTUHL FÜR STRÖMUNGSMECHANIK**

„Optimierung der Methodik zur Erstellung von
Hochwassergefahrenkarten durch verbesserte Nutzung
hochaufgelöster digitaler Geländemodelle“

Diplomarbeit

B. Sc. Katinka Braun

Januar 2009

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Problemstellung	1
1.2	Umfang und Ziel der Arbeit	2
2	Grundlagen der Hochwassergefahrenkarten	3
2.1	Hochwassergefahrenkarten in Baden-Württemberg	3
2.2	Methodik der Überflutungsflächenermittlung	6
3	Geoinformationssysteme	9
3.1	ArcView GIS	9
3.2	Cross Section-Creator	10
3.3	Floodplain-Creator	12
4	Hydrodynamische Berechnungen in HEC-RAS	14
4.1	Hydromechanische Grundgleichungen	14
4.2	Berechnungsvorgang für stationäre Abflüsse	16
4.3	Interpolation von Zwischenprofilen	17
5	Datengrundlagen	19
5.1	Gewässerachse	19
5.2	Digitales Geländemodell	19
5.3	Vermessungsdaten	20
5.4	Hydrologische Daten	20
5.4.1	<i>Regionalisierung</i>	20
5.4.2	<i>Interpolation von Abflüssen</i>	21
5.4.3	<i>Randbedingungen im Mündungsbereich</i>	22
5.5	Sonstige Daten	23
6	Erstellung von Hochwassergefahrenkarten im TBG 402	24
6.1	Beschreibung des Untersuchungsgebiets	24
6.2	Neckar	26
6.2.1	<i>Beschreibung des Gewässers</i>	26
6.2.2	<i>Maßgebende Abflüsse</i>	28
6.2.3	<i>Modellkalibrierung</i>	28
6.2.4	<i>Rauigkeiten</i>	30
6.2.5	<i>Hydraulische Randbedingungen</i>	31
6.2.6	<i>Ergebnisse</i>	32
6.3	Diessenerbach	37
6.3.1	<i>Beschreibung des Gewässers</i>	37
6.3.2	<i>Maßgebende Abflüsse</i>	38
6.3.3	<i>Rauigkeiten</i>	39
6.3.4	<i>Hydraulische Randbedingungen</i>	40
6.3.5	<i>Ergebnisse</i>	40

6.4	Talbach	44
6.4.1	Beschreibung des Gewässers	44
6.4.2	Maßgebende Abflüsse	45
6.4.3	Rauigkeiten	46
6.4.4	Hydraulische Randbedingungen	46
6.4.5	Ergebnisse	47
7	Entwicklung einer neuen Methodik zur Querprofilerzeugung unter Nutzung hochaufgelöster digitaler Geländemodelle	50
7.1	Problemstellung	50
7.2	Lösungsansatz	53
7.3	Umsetzung im XS-Creator	58
8	Untersuchung zur Minimierung des Vermessungsaufwands	63
8.1	Problemstellung	63
8.2	Vorgehensweise	64
8.3	Auswahl exemplarischer Gewässerabschnitte	67
8.4	Sensitivitätsanalyse für den Neckar unterhalb Mühlen	67
8.4.1	Charakterisierung des Gewässerabschnitts	67
8.4.2	Sensitivitätsanalyse ohne Zusatzprofile	68
8.4.3	Sensitivitätsanalyse mit Zusatzprofilen	71
8.5	Sensitivitätsanalyse für den Neckar bei Horb	73
8.5.1	Charakterisierung des Gewässerabschnitts	73
8.5.2	Sensitivitätsanalyse ohne Zusatzprofile	74
8.5.3	Sensitivitätsanalyse mit Zusatzprofilen	78
8.6	Sensitivitätsanalyse für den Talbach	80
8.6.1	Charakterisierung des Gewässerabschnitts	80
8.6.2	Sensitivitätsanalyse ohne Zusatzprofile	81
8.6.3	Sensitivitätsanalyse mit Zusatzprofilen	85
8.7	Zusammenfassung der Ergebnisse und Schlussfolgerungen	87
9	Zusammenfassung	89
	Literaturverzeichnis	92
	Symbolverzeichnis	94
	Abkürzungsverzeichnis	94
	Abbildungsverzeichnis	96
	Tabellenverzeichnis	98
	Anlagenverzeichnis	99
	Selbstständigkeitserklärung	101

1 Einleitung

1.1 Problemstellung

Im Land Baden-Württemberg werden derzeit für eine Gesamtgewässerlänge von ca. 12.500 km Hochwassergefahrenkarten (HWGK) erstellt. Sie zeigen die Ausdehnungen und Überflutungstiefen bei Hochwasserereignissen mit verschiedenen Wiederkehrintervallen auf. Potentielle Hochwassergefährdungen können mit Hilfe der Hochwassergefahrenkarten besser als bisher erkannt und beurteilt werden. Somit ist eine effektive und zielgerichtete Gefahrenabwehr möglich.

Zur Erstellung der HWGK werden die zu erwartenden Wasserstände u. a. mittels hydrodynamischer, eindimensionaler Wasserspiegellagenberechnung ermittelt. Hierin werden die Topografie des Gerinnes und der abflusswirksamen Vorländer mit Hilfe von Querprofilen beschrieben. Die zugehörigen Geländehöhen werden im Bereich des Gewässers aus terrestrischer Vermessung und im Bereich der Vorländer aus einem digitalen Geländemodell (DGM) gewonnen. Diese Kombination ist nötig, da das DGM die Gewässergeomtrie im Bereich des Flussbetts i. d. R. nur unzureichend abbildet.

Die terrestrische Vermessung ist jedoch recht zeit-, arbeits- und kostenintensiv. Aus diesem Grund möchte man den Vermessungsaufwand so gering wie möglich halten. Dies ist beispielsweise durch eine Vergrößerung der Querprofilabstände erreichbar. Wird der Vermessungsumfang reduziert, so hat dies allerdings auch direkten Einfluss auf die Qualität der Rechenergebnisse, da diese einerseits von der Güte und andererseits insbesondere auch von der Anzahl der Querprofile abhängig ist. Werden die Querprofilabstände zu niedrig gewählt, so führt dies zu Ungenauigkeiten in der Berechnung.

Es wird deshalb nach Wegen gesucht, die terrestrische Vermessung einschränken zu können, ohne hinsichtlich der Berechnungsergebnisse große Qualitätseinbußen in Kauf nehmen zu müssen. Bisher konnte dieses Problem noch nicht befriedigend gelöst werden. Denn weder die in der Praxis oftmals

angewendete Methode fehlende Vermessungsquerprofile durch reine Interpolationsprofile zu ersetzen, noch der Versuch Profilschnitte aus einem hochaufgelösten digitalen Geländemodell an Stelle von Vermessungsprofilen für den Aufbau hydraulischer Modell heranzuziehen, bringen hier das gewünschte Ergebnis.

1.2 Umfang und Ziel der Arbeit

Im Rahmen dieser Arbeit sollen exemplarisch Hochwassergefahrenkarten erstellt werden. Dies beinhaltet die Aufbereitung vorhandener Daten, den hydrodynamischen Modellaufbau, die Durchführung von Wasserspiegellagenberechnungen, sowie die Generierung von Überflutungsflächen. Konkret wird hierzu eine 13,5 km lange Fließstrecke des Neckars einschließlich zweier Seitenzuflüsse betrachtet. Alle betrachteten Gewässer liegen im Verwaltungsbereich der Stadt Horb am Neckar.

Des Weiteren soll ein verbessertes Verfahren zur nachträglichen Ergänzung von Querprofilen in Bereichen, in denen keine Geländehöhen aus einer terrestrischen Vermessung vorliegen, entwickelt werden. Das Verfahren soll alle zur Verfügung stehenden Daten optimal nutzen und so umgesetzt werden, dass es in den Arbeitsablauf zur HWGK-Erstellung des Ingenieurbüros WALD + CORBE, Hügelsheim, integriert werden kann.

Mittels Sensitivitätsanalysen soll zudem aufgezeigt werden, welche Konsequenzen hinsichtlich der Qualität der Berechnungsergebnisse sich durch eine Einschränkung der terrestrischen Vermessung ergeben. Dies geschieht durch Nutzung einer unterschiedlichen Anzahl von Profilen (Variation des Querprofilabstands) und Darstellung der jeweiligen Auswirkungen auf die berechneten Wasserspiegelverläufe und die sich hieraus ergebenden Überflutungsflächen.

Darüber hinaus soll überprüft werden, inwieweit sich diese Auswirkungen durch Nutzung des neuen Verfahrens zur nachträglichen Ergänzung von Querprofilen minimieren lassen.

2 Grundlagen der Hochwassergefahrenkarten

2.1 Hochwassergefahrenkarten in Baden-Württemberg

Der §77 Abs. 3 des Wassergesetzes (WG) von Baden-Württemberg sieht die Darstellung von Überschwemmungsgebieten und Überschwemmungskerngebieten in öffentlich ausliegenden Karten vor und bildet somit die rechtliche Grundlage für Hochwassergefahrenkarten (HWGK). Diese zeigen Ausdehnungen und Tiefen von Überflutungen bei Hochwasserereignissen mit verschiedenen Wiederkehrintervallen auf.

In einem Gemeinschaftsprojekt zwischen den Kommunen und dem Land Baden-Württemberg sollen bis 2010 auf einer Gesamtgewässerlänge von ca. 12.500 km Hochwassergefahrenkarten erstellt werden. Für die Umsetzung und Koordination sind die Regierungspräsidien verantwortlich, die wiederum Fachbüros einbeziehen. Die HWGK werden für alle Gewässerstrecken in Baden-Württemberg mit Einzugsgebieten über 10 km² sowie bei Bedarf für hochwassergefährdete Ortslagen mit kleineren Einzugsgebieten erstellt [11].

Die Ausweisung hochwassergefährdeter Gebiete in den HWGK führt zu rechtlichen Konsequenzen für die betroffenen Bereiche. Das Wassergesetz Baden-Württemberg unterscheidet dabei zwischen den Kategorien *Überschwemmungsgebiete*, *Überschwemmungskerngebiete* und *hochwassergefährdete Gebiete im Innenbereich* (vgl. Abb. 2.1). Für die unterschiedlichen Überflutungstypen gelten jeweils unterschiedliche Vorschriften, die im Einzelnen sehr ausführlich in [15] beschrieben sind.

Als *Überschwemmungsgebiete* gelten im Außenbereich

- Gebiete zwischen oberirdischen Gewässern und Deichen oder Hochufern,
- Gebiete, die bei einem hundertjährigen Hochwasserereignis überschwemmt oder durchflossen werden, und

- Gebiete, die auf der Grundlage einer Planfeststellung oder Plangenehmigung für die Hochwasserentlastung oder Rückhaltung beansprucht werden.

In Überschwemmungsgebieten bedürfen einzelne Vorhaben (wie z. B. Zeltplätze, Holzlager, Zäune, Schrebergärten, Aufschüttungen oder Abgrabungen, Siedlungserweiterungen) - über die nach anderen Gesetzen erforderlichen Genehmigungen hinaus - ein besonderes wasserrechtliches Genehmigungsverfahren. Bei der Lagerung von Stoffen gelten die erhöhten Anforderungen der Anlagenverordnung wassergefährdender Stoffe (VAwS).

Überschwemmungskernbereiche sind diejenigen Flächen von Überschwemmungsgebieten, die bei einem zehnjährlichen Hochwasser überschwemmt oder durchflossen werden. Innerhalb dieses Bereichs besteht ein Grünlandumbruchverbot.

Innerorts werden nach §80 WG Überflutungsflächen, die bei einem hundertjährigen Hochwasserereignis, ungeachtet vorhandener Schutzmaßnahmen, überschwemmt oder durchflossen werden als *hochwassergefährdete Flächen im Innenbereich* bezeichnet. In diesen Gebieten kann die Ortspolizeibehörde Anordnungen zum Schutz der Umwelt und zur Abwehr von Gefahren durch Hochwasser treffen. Dies betrifft Regelungen zum Objektschutz, sowie die Verhaltensvorsorge im Hochwasserfall. Zudem sind auch hier die Bestimmungen der VAwS zu beachten.

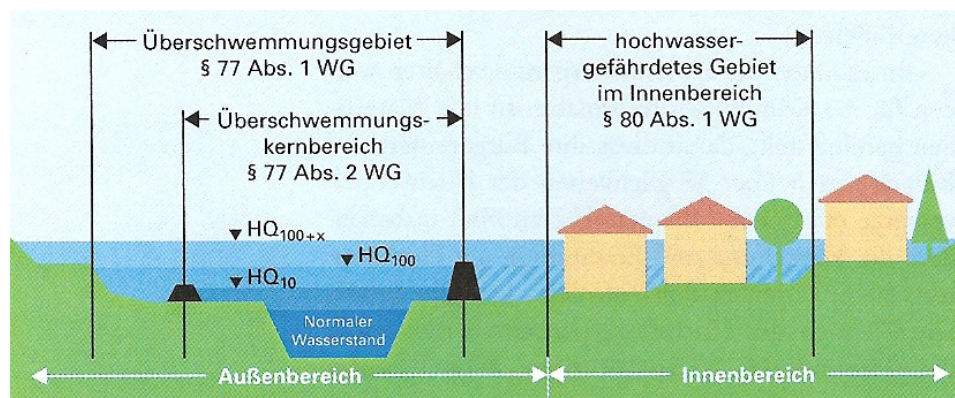


Abb. 2.1 Gebietsabgrenzungen nach dem Wassergesetz Baden-Württemberg [15]

Auch für Regionalpläne sind HWGK von Bedeutung. Hier werden

- *Vorranggebiete* für den vorbeugenden Hochwasserschutz zur Vermeidung neuer Schadensrisiken, Erhaltung und Aktivierung natürlicher Überschwemmungsflächen, sowie zur Erhaltung der Möglichkeiten der Gewässerentwicklung und Auenrenaturierung und
- *Vorbehaltsgebiete* für den vorbeugenden Hochwasserschutz zur Minderung der Schadensrisiken

festgesetzt. Vorranggebiete sind grundsätzlich von weiterer Bebauung freizuhalten. In Vorbehaltsgebieten besitzt der vorbeugende Hochwasserschutz bei der Abwägung mit konkurrierenden Nutzungen einen besonderen Stellenwert. Die HWGK bilden dabei die Basis zur Ausweisung dieser Gebiete.

Um im Hochwasserfall schnell und richtig reagieren zu können, werden zur Gefahrenabwehr seitens des Katastrophenschutzes detaillierte Alarm- und Einsatzpläne benötigt. Bei der Ausarbeitung dieser Pläne stellen die HWGK eine wesentliche Grundlage dar. Anhand von HWGK werden in Alarmplänen Auslöseschwellen für verschiedene Alarmierungsphasen festgelegt. In den Einsatzplänen sind die Vorsorge- und Gefahrenabwehrmaßnahmen für verschiedene Wasserspiegellagen geregelt. Diese leiten sich aus der Darstellung von überfluteten bzw. durch Überflutung gefährdeten Bereichen der HWGK ab.

Neben den rechtlichen Konsequenzen sollte die informative Seite der HWGK nicht unterschätzt werden. So werden die Karten nicht nur der Verwaltung zur Verfügung gestellt, sondern sind auch öffentlich für jeden zugänglich (z. B. durch das Internet). Bürger, aber auch Firmen und Unternehmen, können so ihr persönliches Risikopotenzial abschätzen und entsprechende Vorsorgemaßnahmen treffen, um ihr Eigentum entsprechend zu schützen (z. B. durch eine hochwasserangepasste Bauweise).

Eine besondere Rolle stellen die HWGK außerdem auch für die Versicherungen dar, für die es von Bedeutung ist, wie stark ein zu versicherndes Gebäude der Hochwassergefahr ausgesetzt ist. Schon jetzt gibt es vom Gesamtverband der Deutschen Versicherungswirtschaft e. V. ein eigenes, grobes Zonierungs-

modell, das je nach statistischer Hochwasserauftretenswahrscheinlichkeit vier Gefährdungsklassen ausweist. Liegen in einem Gebiet HWGK vor, so können die sich hieraus ergebenden wesentlich detaillierteren Überflutungsinformationen unmittelbar für die Risikoabschätzung genutzt werden. Die Bewertung des Risikopotentials erfolgt somit fundierter und die Einteilung in eine Gefährdungsklasse wird erleichtert.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass mit der Einführung von Hochwassergefahrenkarten ein Beitrag zur Minimierung von Hochwasserschäden sowohl durch verbesserte Vorsorge, als auch durch effektives Handeln im Hochwasserfall geleistet wird.

2.2 Methodik der Überflutungsflächenermittlung

Die Ermittlung von Überflutungsflächen basiert auf hydraulischen Wasserspiegelberechnungen. Je nach hydraulischer Fließsituation werden in der Praxis sowohl ein-, als auch zweidimensionale Berechnungsmodelle eingesetzt. Da in den meisten Fällen eindimensionale Berechnungen zu ausreichend genauen Ergebnissen führen, beschränkt sich die Anwendung der deutlich aufwändigeren zweidimensionalen Berechnungsmodelle zumeist auf kleinräumige Detailsituation.

Im Folgenden wird das Vorgehen zur Bestimmung von Überflutungsflächen auf Basis eines eindimensionalen hydrodynamischen Modells (z. B. HEC-RAS) in Verbindung mit einem Geoinformationssystem (z. B. ArcView GIS) beschrieben. Das grundsätzliche Ablaufschema wird in Abb. 2.2 verdeutlicht.

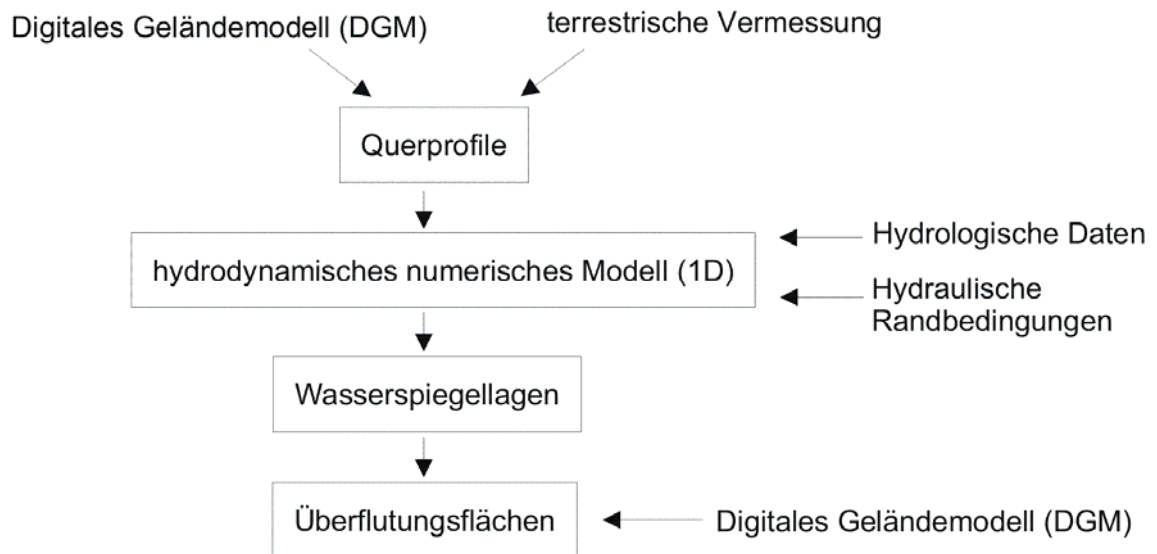


Abb. 2.2 Verfahrensschema zur Ermittlung von Überflutungsflächen

Die Abbildung der Gewässermorphologie im numerischen Modell erfolgt bei eindimensionalen hydraulischen Berechnungen über Gewässerquerprofile. Im ersten Schritt der Überflutungsflächenermittlung werden deshalb zunächst senkrecht zur Fließrichtung repräsentative Querprofile erstellt, die die Topografie des Untersuchungsgebiets widerspiegeln. Die Querprofile entstehen aus der Kombination eines digitalen Geländemodells (DGM) für die Vorländer und der terrestrischen Vermessung des Gewässerschlauchs (inklusive eines Gewässerrandstreifens von 5 bis 10 m). An Bauwerken, wie Brücken und Wehren werden zusätzliche bauwerksspezifische Informationen benötigt (Wehroberkante, Verdolungsdurchmesser, Brückenbreite, etc.). Für die Zusammenführung der unterschiedlichen Daten eignet sich der Einsatz von sogenannten Geoinformationssystemen (siehe Kapitel 3).

Aufbauend auf den Gewässerquerprofilen wird mithilfe geeigneter Software (z. B. HEC-RAS) ein hydronumerisches Fließgewässermodell aufgestellt, das zur Berechnung von Wasserspiegellagen dient. Als Eingangsparameter sind neben den Querprofilgeometrien auch hydrologische Daten notwendig. Die Hochwassergefahrenkarten beruhen auf den Abflusswerten für Hochwasserereignisse mit einer statistischen Auftretenswahrscheinlichkeit von 2, 10, 20, 50 und 100 Jahren (HQ_2 , HQ_{10} , HQ_{20} , HQ_{50} , HQ_{100}). Darüber hinaus wird ein extremes Katastrophenhochwasser nachgebildet, das aus statistischer Sicht in etwa einem 1000-jährlichen Ereignis entspricht (HQ_{ext}). Die den

hydraulischen Berechnungen zugrunde liegenden Abflusswerte ergeben sich über die auf einem Regionalisierungsansatz basierende Untersuchung „Abflussskennwerte in Baden-Württemberg“ der Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg (LUBW) (vgl. [8]). Weitere hydraulische Parameter wie Rauigkeitsbeiwerte, Verlustbeiwerte an Einschnürungen/Aufweitungen etc. werden mit Hilfe von Fotos, Ortsbegehungen und/oder aus Erfahrungswerten bestimmt. Liegen detaillierte Abfluss- und Wasserstandsinformationen (Hochwassermarken) von abgelaufenen Hochwassern vor, so erfolgt eine Kalibrierung des Modells auf Grundlage der beobachteten Wasserstände. Die hydraulische Berechnung liefert für vorgegebene Abflüsse an jedem Querprofil die zu erwartenden Wasserstände.

Zur Ermittlung der Überschwemmungsflächen werden die eindimensional berechneten Wasserstände zu einem flächendeckenden Raster interpoliert. Es erfolgt eine Verschneidung des Rasters der Gewässeroberfläche mit dem digitalen Geländemodell. Hierbei ist zu beachten, dass das zu Grunde liegende Geländemodell die Topografie des Gewässers und des daran anschließenden Geländes ausreichend genau abbildet und alle aus hydraulischer Sicht relevanten Strukturen, wie z.B. Deiche oder Mauern enthält. Aus der Verschneidung von Gewässer- und Geländeoberfläche resultieren Überflutungsflächen (unmittelbar überflutet) und Druckwasserbereiche (ohne Kontakt zum Hauptgewässer). Aus der Differenz zwischen den Höhen der Gewässeroberfläche und der Geländeoberfläche ergibt sich unmittelbar die Überflutungstiefe.

3 Geoinformationssysteme

Geographische Informationssysteme (GIS), auch Geoinformationssysteme genannt, sind computerbasierte Systeme zur Erfassung, Speicherung und Analyse raumbezogener Daten [3]. Sie wurden ursprünglich in den 60er Jahren für den Bereich der Kartografie entwickelt. In den 90er Jahren hielten sie Einzug in die wasserwirtschaftliche Praxis und gelten heute als Standard [6].

3.1 ArcView GIS

Für die vorliegende Arbeit wurde die Software ArcView GIS (Version 3.3) des kalifornischen Unternehmens Environmental Systems Research Institute (ESRI) verwendet. Das Programmpaket bietet nicht nur die Möglichkeit raumbezogene Daten einzulesen und darzustellen, sondern auch diese zu erfassen und zum Zweck gezielter Informationsgewinnung abzufragen, zu manipulieren und zu analysieren. So ist beispielsweise die Visualisierung, Verschneidung, Selektion und Überlagerung von Raster- und Vektordaten (wie z. B. topografische Karten, Luftbilder, Digitale Geländemodelle, Gewässerachsen, Querprofile) möglich.

Den Funktionsumfang von ArcView GIS gewährleistet die objektorientierte Programmiersprache Avenue. Sie ist im Leistungsumfang von ArcView GIS enthalten und dient als Anpassungs- und Entwicklungsumgebung für den Anwender [5]. Mit ihr können die Funktionen der Software erweitert werden. Als Hilfswerkzeug zur Ermittlung von Überschwemmungsflächen haben Mitarbeiter des Ingenieurbüros WALD + CORBE die firmeninternen Programme „Cross Section-Creator“ und „Floodplain-Creator“ entwickelt, die für die vorliegende Arbeit benutzt wurden und in den folgenden Abschnitten beschrieben werden.

3.2 Cross Section-Creator

Das Programm „Cross Section-Creator“¹ (kurz: XS-Creator) stellt eine Erweiterung von ArcView GIS dar und wurde vom Ingenieurbüro WALD + CORBE entwickelt. Es dient zur vereinfachten Erzeugung von Querprofilen für das eindimensionale Wasserspiegellagenprogramm HEC-RAS. Im Rahmen der HWGK werden die Querprofile aus der Kombination eines digitalen Geländemodells und der terrestrischen Vermessung im Bereich des Gewässerschlauchs gewonnen. Die Vermessungsdaten liegen in dem landes-einheitlichen Datenformat WPROF vor (siehe auch Kapitel 5.3).

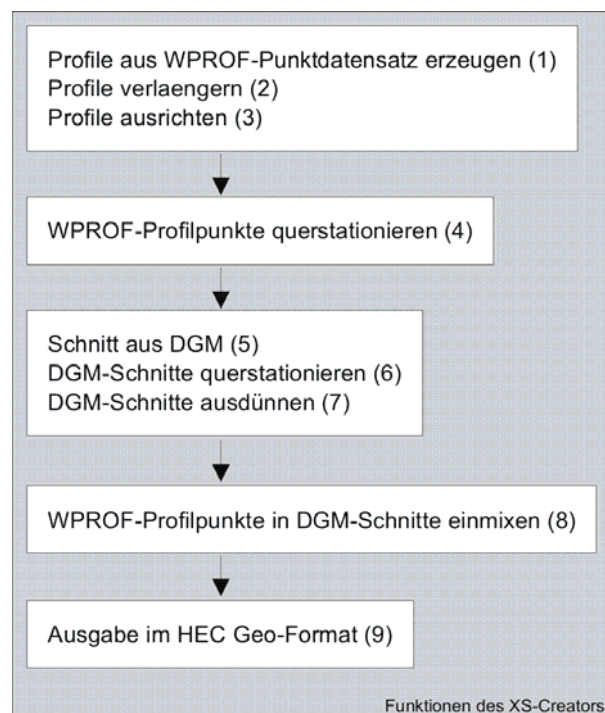


Abb. 3.1 Ablaufschema des XS-Creators

Eine Übersicht der im Folgenden beschriebenen Funktionen des XS-Creators ist in Abb. 3.1 dargestellt. Zunächst müssen die WPROF-Daten in GIS-Formate („Shape-Formate“²) umgewandelt werden. Aus den Vermessungspunkten

¹ Engl. cross-section = Querprofil.

² eigenes Datenformat von ArcView GIS zum Speichern von geometrischen Ort- und Attributinformationen geographischer Objekte.

werden die Lagelinien der Querprofile im Shape-Format erzeugt (1). Anschließend erfolgt eine automatisierte Verlängerung der Linien bis zum Rand des Untersuchungsgebiets (2), das zuvor vom Bearbeiter durch Umgrenzungslinien festgelegt wurde. Teilautomatisiert werden die Lagelinien senkrecht zur erwarteten Strömungsrichtung ausgerichtet (3). Den vorhandenen terrestrischen Vermessungspunkten werden Querstationierungen entlang der Lagelinien und im Bezug zum Schnittpunkt der Gewässerachse zugewiesen (4). Entlang der verlängerten und ausgerichteten Profillagelinien werden nun die zugehörigen Höhenwerte aus dem vorliegenden DGM ermittelt und somit Querprofile herausgeschnitten (5). Die DGM-Schnitte erhalten die entsprechenden Stationierungen entlang einer vorgegebenen Gewässerachse (6). Ferner ist es möglich, die Anzahl der Stützstellen in den Schnitten durch ein spezielles Filterverfahren zu reduzieren, um damit die Datenmenge zu minimieren (7). Im nächsten Schritt werden die Geländehöhen der DGM-Schnitte in den Bereichen, in denen Höhen aus der terrestrischen Vermessung vorliegen, durch diese ersetzt (8). Als letztes erfolgt eine Umwandlung der Daten in das HEC-RAS-Datenformat (9). Strömungsundurchlässige Bereiche (beispielsweise Gebäude) können vorab manuell durch Polygone abgegrenzt und somit bei der Profilausgabe berücksichtigt werden. Aufgrund des standardisierten Vermessungsdatenformats werden Bauwerksgeometrien ebenfalls ausgegeben.

Das Ergebnis ist eine nahezu fertige Modellgeometrie für HEC-RAS, in der Gewässerachsen, gegliederte Querprofile, Bauwerke, Abflusshindernisse, sowie Verknüpfungen zu Bildern und Bauwerksskizzen enthalten sind.

Eine ausführliche Erläuterung zur Funktionsweise des XS-Creators kann Anlage A.1 entnommen werden.

3.3 Floodplain-Creator

Die eindimensionalen hydraulischen Berechnungen mit HEC-RAS liefern für jedes Querprofil einen querschnittsgemittelten Wasserstand. Um aus den berechneten Wasserständen Überflutungsflächen zu ermitteln, bietet sich eine weitere Bearbeitung mit GIS-Werkzeugen an. Als wertvolle Hilfe eignet sich hier die firmeninterne Erweiterung von ArcView GIS „Floodplain-Creator³“ (kurz: FP-Creator) des Ingenieurbüros WALD + CORBE, die für diese Arbeit zum Einsatz kam.

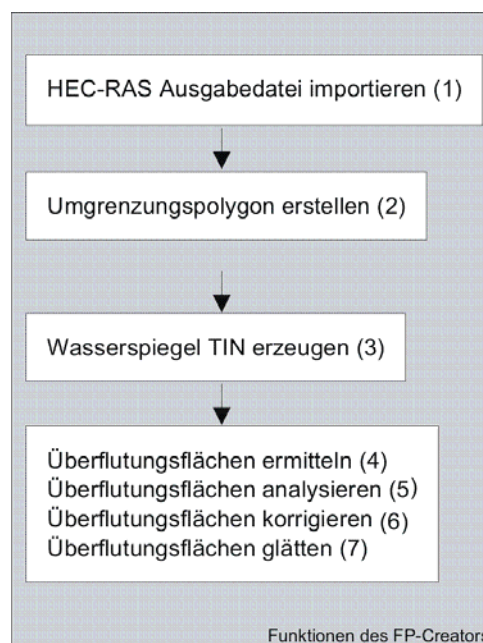


Abb. 3.2 Ablaufschema des FP-Creators

Die verwendeten Funktionen des FP-Creators sind in Abb. 3.2 dargestellt. Im ersten Schritt werden die Ausgabedateien von HEC-RAS importiert und in das ArcView GIS Shape-Datenformat umgewandelt (1). Die Querprofile werden in einem Linienthema dargestellt, wobei die zugehörigen Ergebnisse der Wasserspiegellagenberechnung als Attribute übernommen werden. Entlang der Profildaten wird ein Umgrenzungspolygon erstellt (2). Innerhalb dieses Umgrenzungspolygons erfolgt die Berechnung der Wasserspiegeloberfläche (ausgehend von den Wasserspiegelhöhen der Querprofile) über eine Dreiecks-

³ Engl. floodplain = Überschwemmungsgebiet.

vermaschung (TIN⁴) (3). Das Umgrenzungspolygon verhindert hierbei eine fehlerhafte Berechnung des TINs, die in Innenkrümmungen durch die Verbindung weit voneinander entfernter Punkte auftreten kann. Durch die Verschneidung der Wasseroberfläche mit dem Geländemodell ergeben sich Überflutungsflächen. Da dieser Prozess rasterbasiert erfolgt, müssen im Vorfeld der Verschneidung sowohl das Wasserspiegel-TIN als auch ggf. das Geländemodell, das ebenfalls in Form eines TINs vorliegen kann, intern in ein Raster⁵ überführt werden. Aus dem Verschneidungsvorgang resultieren als Differenz zwischen der Wasseroberfläche und dem Gelände unmittelbar die Überflutungstiefen, die als Wassertiefenraster ausgegeben werden. Bereiche mit positiven Wassertiefen, also Flächen, bei denen der Wasserspiegel über dem DGM liegt, stellen potentielle Überflutungsflächen dar und werden separat in Form von Polygonen gespeichert (4). Der Verschneidungsvorgang führt teilweise zu sehr kleinen Überflutungsflächen („Seen“) bzw. zu Überflutungsflächen mit sehr kleinen Löchern („Inseln“). Zur Verbesserung der Übersichtlichkeit sollten diese eliminiert werden. Hierfür werden alle Flächen einer Analyse unterworfen und anhand zu definierender Kriterien, die die Flächengröße und die mittlere Wassertiefe betreffen, eingeteilt (5). Im Anschluss kann eine Korrektur der Überflutungsflächen erfolgen, indem kleine Flächen ausgesondert werden und das Wassertiefenraster entsprechend angepasst wird (6). Im letzten Schritt erfolgt die Glättung der Kanten der Überflutungsflächenumgrenzungen, da diese, bedingt durch die Ableitung aus einem Raster, zahlreiche 90°-Ecken aufweisen (7).

Ergebnisse einer Bearbeitung mit dem FP-Creator sind die Flächenausbreitungen der Überflutungen, die zugehörigen Wassertiefen und die Wasserspiegellagen. Diese können direkt in standardisierten Hochwassergefahrenkarten dargestellt werden. Eine ausführliche Erläuterung zur Funktionsweise des FP-Creators kann auch Anlage A.2 entnommen werden.

⁴ Abkürzung von „Triangulated Irregular Network“; bezeichnet die Darstellung einer kontinuierlichen Oberfläche durch unregelmäßige Dreiecksnetze.

⁵ Bezeichnet die Darstellung einer kontinuierlichen Oberfläche durch ein gleichmäßiges Gitter.

4 Hydrodynamische Berechnungen in HEC-RAS

Zur Berechnung der Wasserspiegellagen wurde das eindimensionale Strömungsmodell HEC-RAS (Version 4.0) verwendet. Die von den US Army Corps of Engineers entwickelte Software steht kostenlos über das Internet zur Verfügung. Das Programm ermöglicht sowohl stationäre als auch instationäre Berechnungen. Die vorliegende Arbeit beruht auf der Simulation von stationären Abflüssen, die in diesem Kapitel erläutert wird.

4.1 Hydromechanische Grundgleichungen

Grundlage der eindimensionalen Wasserspiegellagenberechnung von HEC-RAS für stationär ungleichförmigen Strömungsverhältnissen bildet die *Bernoulli*-Gleichung. Die Gleichung wird jeweils für zwei Profile iterativ gelöst, die hier mit den Indizes 1 und 2 gekennzeichnet sind.

$$W_1 + \frac{\alpha_1 \cdot v_1^2}{2 \cdot g} = W_2 + \frac{\alpha_2 \cdot v_2^2}{2 \cdot g} + h_e \quad \text{Gl. 4.1}$$

W_i	Wasserspiegellhöhe	bezogen auf Bezugshorizont		
v_i	mittlere Geschwindigkeit		α_i	Geschwindigkeitsbeiwert
g	Erdbeschleunigung		h_e	Energieverlusthöhe

Die *Bernoulli*-Gleichung ergibt sich aus der Betrachtung des Energiegleichgewichts gemäß Abb. 4.1.

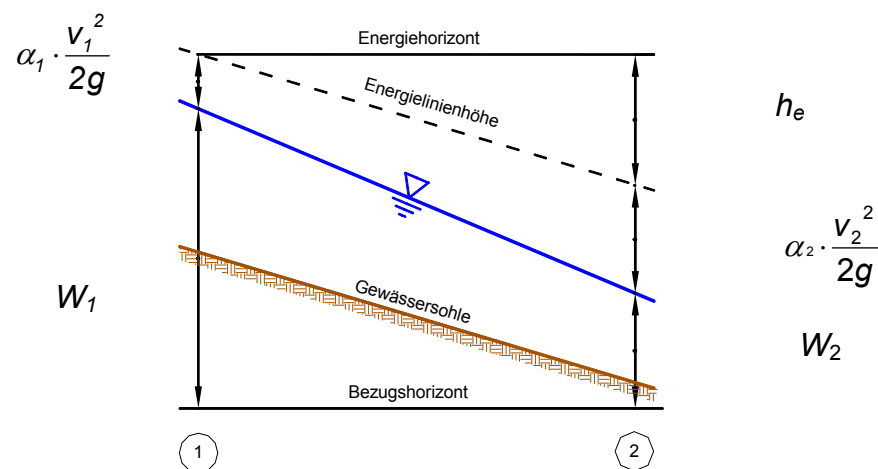


Abb. 4.1 Ableitung der Bernoulli-Gleichung

Die Energieverlusthöhe h_e zwischen zwei Profilen setzt sich zusammen aus den mittleren Reibungsverlusten und den Energieverlusten, die sich durch Änderung des Fließquerschnitts (Querkontraktion/-expansion) ergeben:

$$h_e = L \cdot \overline{S_f} + C \cdot \left| \frac{\alpha_2 \cdot v_2^2}{2g} - \frac{\alpha_1 \cdot v_1^2}{2g} \right| \quad \text{Gl. 4.2}$$

$\overline{S_f}$ mittlerer Reibungsverlustkoeffizient L durchflussgewichtete Fließlänge
 C Expansions-, Kontraktionskoeffizient

Der mittlere Reibungsverlustkoeffizient $\overline{S_f}$ berechnet sich aus:

$$\overline{S_f} = \left(\frac{Q_1}{K_1} + \frac{Q_2}{K_2} \right)^2 \quad \text{Gl. 4.3}$$

Q_i Durchfluss K_i Abfuhrfähigkeit, engl. „conveyance“

Die spezifischen Sohlrauheiten, sowie die unterschiedlichen Querprofilgeometrien werden durch die Abfuhrfähigkeit K (engl.: „conveyance“) berücksichtigt. Diese setzt sich aus der Summe der Abfuhrfähigkeiten für das rechte Vorland, das linke Vorland, sowie des Flussschlauchs zusammen. Sie werden jeweils getrennt berechnet durch:

$$K = \frac{1,486}{n} \cdot A \cdot R^{\frac{2}{3}} \quad \text{Gl. 4.4}$$

n Rauigkeitsbeiwert nach Manning A abflusswirksamer Fließquerschnitt
 R hydraulischer Radius

Die unterschiedliche Geschwindigkeitsverteilung in den Vorländern und im Flussschlauch wird durch eine gewichtete Berechnung des Geschwindigkeitsbeiwerts α berücksichtigt:

$$\alpha = \frac{A_t^2 \cdot \left(\frac{K_l^3}{A_l^2} + \frac{K_m^3}{A_m^2} + \frac{K_r^3}{A_r^2} \right)}{K_t} \quad \text{Gl. 4.5}$$

K_t	gesamte Abfuhrfähigkeit im Querprofil
$K_{l,m,r}$	Abfuhrfähigkeit im linken Vorland, im Flussschlauch, im rechten Vorland
A_t	gesamter abflusswirksamer Fließquerschnitt
$A_{l,m,r}$	abflusswirksamer Fließquerschnitt im linken Vorland, im Flussschlauch, im rechten Vorland

Alle Gleichungen in diesem Abschnitt können auch [18] entnommen werden.

4.2 Berechnungsvorgang für stationäre Abflüsse

Für stationäre Abflüsse werden die Wasserspiegellagen in HEC-RAS nach folgendem Schemata iterativ berechnet. Grundlage bilden Gl. 4.1 bis Gl. 4.5.

1. Vorgabe einer Startwasserspiegellage („untere Randbedingung“) im Auslaufprofil des zu betrachteten Gewässerabschnitts bei strömendem Abfluss. Bei schießendem Abfluss Vorgabe einer Startwasserspiegellage („obere Randbedingung“) im Zulaufprofil des zu betrachteten Gewässerabschnitts.
2. Annahme eines Wasserspiegels für das Profil im Oberstrom bei strömendem Abfluss bzw. für das Profil im Unterstrom bei schießendem Abfluss.
3. Bestimmung der Abfuhrfähigkeit K und des Geschwindigkeitsbeiwert α mit dem angenommenen Wasserspiegel.
4. Berechnung des Reibungsbeiwerts $\overline{S_f}$ und der Energieverluste h_e mit Hilfe der Werte aus Schritt 3.
5. Lösung der Bernoulli-Gleichung nach der Wassertiefe W mit den Werten aus Schritt 3 und 4.
6. Vergleich der berechneten Wassertiefe mit der angenommen Wassertiefe. Ist die gewünschte Genauigkeit nicht erreicht, so werden die Schritte 2 bis 6 wiederholt.

4.3 Interpolation von Zwischenprofilen

Wasserspiegellagenberechnungen mit HEC-RAS verlieren an Genauigkeit, wenn die vorhandenen Querprofile zu große Abstände aufweisen⁶. Deshalb bietet HEC-RAS die Möglichkeit, vorhandene Querprofile mit interpolierten Querprofilen zu ergänzen und so die Querprofilabstände zu verkürzen.

Eine Interpolation findet jeweils zwischen zwei bekannten Querprofilen statt (siehe Abb. 4.2). Die Stützstellen der Querprofile werden in Haupt- und Nebenstützstellen („master and minor cords“ [17]) eingeteilt.

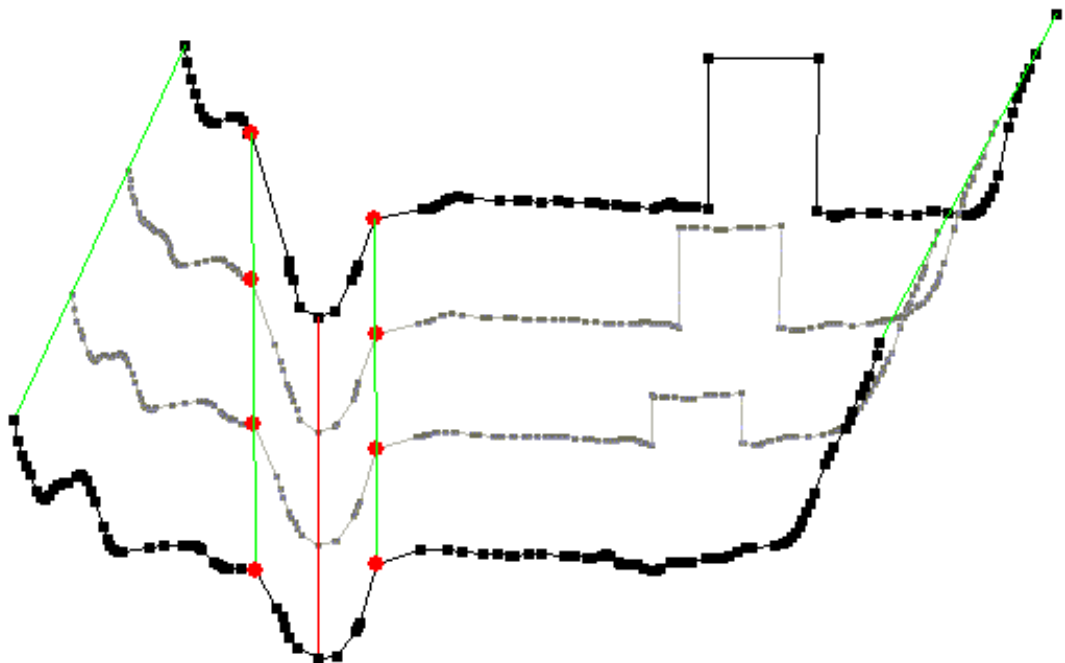


Abb. 4.2 Querprofilinterpolation von zwei Profilen (grau hinterlegt) mit HEC-RAS

Mithilfe der fünf Hauptstützstellen jeweils an den Profilenden, an den Uferborden und dem Gewässersohltiefpunkt werden die Querprofile in ein rechtes und linkes Vorland sowie in ein rechtes und linkes Gewässerbett eingeteilt.

⁶ Bei zu großem Querprofilabstand wird die Energieverlusthöhe h_e nicht exakt berechnet (Näheres siehe in [16]).

Nebenstützstellen werden dadurch generiert, dass man zu bekannten Koordinaten im Oberstromprofil, entsprechende Koordinaten im Unterstromprofil interpoliert. Ebenso werden zu bekannten Koordinaten des Unterstromprofils Koordinaten im Oberstromprofil interpoliert. Die Querstationierung der zu interpolierenden Stützstelle berechnet sich hierbei aus dem prozentualen Abstand der bekannten Stützstelle zwischen zwei Hauptstützstellen. Die Anzahl der Nebenstützstellen ist gleich der Summe aller Stützstellen im Oberstrom- und Unterstromprofil abzüglich der Anzahl der Hauptstützstellen.

Die Stützstellen des zu interpolierenden Querprofils ergeben sich aus einer linearen Interpolation der Höhen an allen Haupt- und Nebenstützstellen.

5 Datengrundlagen

5.1 Gewässerachse

Die Gewässerachse (auch „Centerline“ genannt) gibt die Lage bzw. den genauen Verlauf des Gewässers wieder. Den hier verwendeten Gewässerachsen liegen die offiziellen HWGK-Gewässerachsen zu Grunde, die das Ingenieurbüro WALD + CORBE vom Auftraggeber, dem Umweltministerium Baden-Württemberg, erhalten hat. Dieses Gewässernetz wurde auf Basis des Amtlichen Wasserwirtschaftlichen Gewässernetzes Baden-Württemberg (AWGN) aufbereitet und von den Kommunen, Landratsämtern und Regierungspräsidien korrigiert [4].

5.2 Digitales Geländemodell

Für das gesamte Land Baden-Württemberg wurde vom Landesvermessungsamt ein digitales Geländemodell (DGM) in einem 1x1 m Raster erstellt. Die Lagegenauigkeit des durch eine Laserscan-Befliegung erstellten DGMs liegt im Bereich von +/- 50 cm, die Höhengenaugigkeit bei +/- 20 bis 30 cm [4]. Im Zuge einer Nachbearbeitung wurden Vegetation, Hochbauten und sonstige künstliche Objekte herausgefiltert und die dadurch entstandenen Lücken im Datensatz durch Interpolation geschlossen. Dieses DGM wurde für die vorliegende Arbeit verwendet. Das DGM weist im Bereich des Gewässerbetts und Ufernahbereichs insbesondere bei dicht bewachsenen Gewässerverläufen keine ausreichende Genauigkeit auf [10]. Es ist vorgesehen, dass zur Erzeugung von HWGK dieses DGM hydraulisch plausibel aufbereitet wird. Dies beinhaltet beispielsweise die Integration des Gewässerschlauchs in das DGM. Ebenso werden hydraulisch wirksame Geländeformen, wie gewässerbegleitende Strukturen und Schutzeinrichtungen, die nicht vom DGM erfasst sind, mit einbezogen. Die Erzeugung dieses hydraulisch plausibilisierten DGMs ist Aufgabe des Auftraggebers. Bis zum Zeitpunkt der Erstellung dieser Diplomarbeit lag das aufbereitete DGM noch nicht vor und konnte nicht verwendet werden. Da jedoch im Bearbeitungsgebiet keine fehlenden Strukturen und Schutzeinrichtungen gefunden wurden, sind die Ergebnisse dennoch hydraulisch korrekt. Lediglich die Überflutungsflächen- und

tiefen im Bereich des Gewässerschlauchs können in den Karten fehlerhaft dargestellt sein. Dies betrifft jedoch nur den Gewässerschlauch selbst und ist für die Aussagekraft der Ergebnisse nicht weiter relevant.

5.3 Vermessungsdaten

Durch das Laserscan-Verfahren zur Erstellung des DGMs wird der Bereich direkt am Gewässer und unterhalb des Wasserspiegels nicht genau erfasst. Aus diesem Grunde wurden bzw. werden im Zuge der HWGK trotz vorliegendem DGM für alle relevanten Gewässer das Gewässerbett einschließlich Uferbereich sowie Bauwerksgeometrien terrestrisch vermessen. Für das Untersuchungsgebiet lagen hinreichend genaue Vermessungsdaten vor, die von einem Vermessungsbüro in Zusammenarbeit mit begleitenden Hydraulikern aufgenommen wurden. So waren Daten von aufgenommenen Gewässerquerprofilen sowie von hydraulisch wirksamen Bauwerken wie Brücken, Verdolungen, Wehre und Abstürze vorhanden. Die Vermessungsdaten wurden in dem landeseinheitlichen Datenformat WPROF geliefert, in dem sowohl die Form der Daten als auch die Inhalte der Daten und die Benennung der verschiedenen Informationen landeseinheitlich festgelegt ist [13]. Des Weiteren existierten von allen aufgenommenen Querprofilen und Bauwerken Aufnahmen sowie Zeichnungen im PDF- und DXF-Format.

5.4 Hydrologische Daten

5.4.1 Regionalisierung

Hydrologische Bemessungskennwerte wurden, soweit vorhanden, aus dem für Baden-Württemberg vorliegenden Regionalisierungsverfahren für Hochwasserabflüsse entnommen (siehe [8]). Dieses Verfahren ist am Institut für Wasser und Gewässerentwicklung (IWG) der Universität Karlsruhe entwickelt worden. Es liefert Hochwasserscheitelabflüsse, im Folgenden als HQ-Abflüsse bezeichnet, an bestimmten Stützstellen der Gewässer Baden-Württembergs („Regionalisierungsknoten“). Grundlage der Regionalisierung bildet eine multiple Regressionsanalyse zwischen den Abflussdaten vorhandener Pegel, sowie Kenngrößen der jeweiligen Einzugsgebiete (z. B. Einzugsgebietsfläche, Bebauungs- und Waldanteil, Fließlänge, mittlerem jährlichen Niederschlag). Da

in dem oben genannten Regionalisierungsverfahren sehr kleine Gewässer nicht berücksichtigt waren, wurden durch das IWG zusätzlich Bemessungskennwerte für weitere Regionalisierungsknoten im Oberlauf und an den Einmündungen zahlreicher HWGK-Nebengewässer berechnet. Auch diese Daten standen in Form einer Shape⁷ mit den Regionalisierungsknoten und den dazugehörigen Abflüssen zur Verfügung.

5.4.2 Interpolation von Abflüssen

Um eine annähernd realistische und stetige Zunahme der HQ-Abflüsse zu simulieren, wurden bei Bedarf Scheitelabflüsse an Zwischenknoten (HQ_{Zk}) interpoliert. Hierbei stellt die in [8] vorgeschlagene flächenproportionale Interpolationsformel die Richtlinie dar:

$$r = \frac{(A_{Zk} - A_{Oberlauf})}{(A_{Unterlauf} - A_{Oberlauf})} \quad \text{Gl. 5.1}$$

$$d = HQ_{Unterlauf} - HQ_{Oberlauf} \quad \text{Gl. 5.2}$$

$$HQ_{Zk} = HQ_{Oberlauf} + (d \cdot r) \quad \text{Gl. 5.3}$$

$$HQ_{Zk} = HQ_{Oberlauf} + \left(\frac{(A_{Zk} - A_{Oberlauf})}{(A_{Unterlauf} - A_{Oberlauf})} \right) \cdot (HQ_{Unterlauf} - HQ_{Oberlauf}) \quad \text{Gl. 5.4}$$

In Abb. 5.1 sind die Bezeichnungen in den oben stehenden Gleichungen erläutert. Im Anlage B.1 ist die Lage aller für das Bearbeitungsgebiet relevanten Knotenpunkte aus dem Regionalisierungsverfahren, sowie aus der Interpolation in einer Übersichtskarte dargestellt.

⁷ ArcView GIS eigenes Datenformat zum Speichern von geometrischen Orts- und Attributinformationen geographischer Objekte.

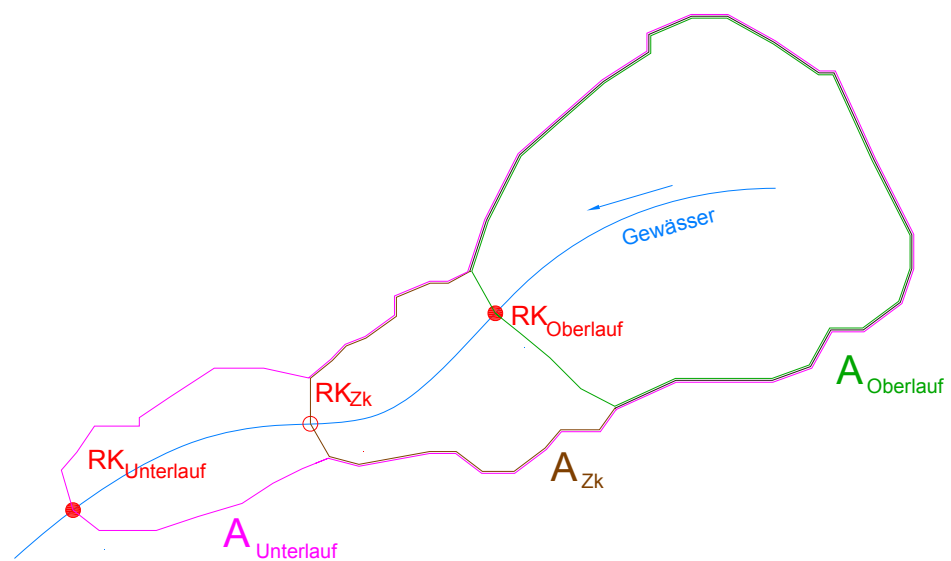


Abb. 5.1 Interpolation zwischen zwei Regionalisierungsknoten

5.4.3 Randbedingungen im Mündungsbereich

Bei der Durchführung stationärer, hydraulischer Berechnungen müssen bei strömenden Abflussverhältnissen am unteren Modellrand im Bereich der Mündungen Wasserstandsrandbedingungen vorgegeben werden. Hierbei handelt es sich um Angaben zum Wasserstand des Vorfluters in der Einmündung, der im direkten Zusammenhang mit dem Abfluss im Vorfluter steht. Bei der Wahl der Wasserstandsrandbedingung ist es von Bedeutung, welche Jährlichkeit des Hochwasserabflusses im betrachteten Nebengewässer auf welche Jährlichkeit des Hochwassers im Vorfluter zusammen trifft („Gleichzeitigkeit von Hochwasserereignissen“). Eine Auswertung des Ingenieurbüros Dr.-Ing. Karl Ludwig, Karlsruhe, zeigte, dass kein eindeutiger Zusammenhang zwischen den Jährlichkeiten zeitgleich auftretender Hochwasser in Haupt- und Nebengewässer besteht [12]. In [12] wird ein pragmatischer Lösungsansatz vorgestellt, um dennoch Aussagen über das zeitgleiche Zusammentreffen von Hochwasserscheiteln im Mündungsbereich zu erhalten und somit ein einheitliches Vorgehen für die HWGK-Bearbeitung sicherzustellen. Die sogenannte „Mündungsformel“ ermöglicht eine Abschätzung des bei einem T-jährlichen Hochwasser des Nebengewässers anzusetzenden Abflusses im Vorfluter. Die Mündungsformel besagt, dass der im Vorfluter anzusetzende Abfluss das Produkt aus dem Verhältnis der

logarithmierten HQ_T -Werte (Zufluss und Vorfluter vor dem Mündungspunkt) und dem HQ_T -Wert des Vorfluters nach der Einmündung ist:

$$Q_{\text{nach Mündung}} = \frac{\ln(HQ_{T \text{ Zufluss}})}{\ln(HQ_{T \text{ Vorfluter vor Mündung}})} \cdot HQ_{T \text{ Vorfluter nach Mündung}} \quad \text{Gl. 5.5}$$

In Abb. 5.2 sind die Bezeichnungen der obenstehenden Gleichung erläutert.

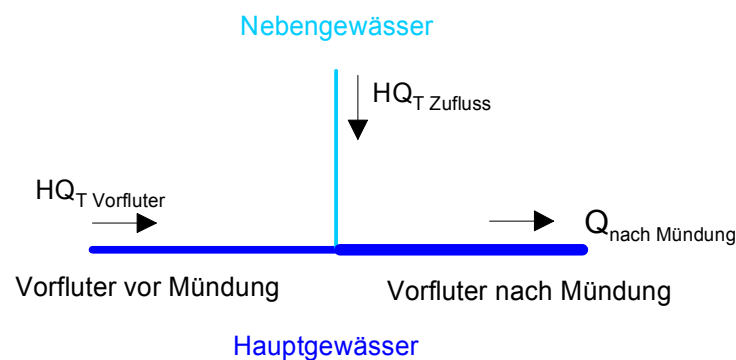


Abb. 5.2 Zusammenhang der Durchflüsse in der Mündungsformel

Mit Hilfe des hydraulischen Modells des Vorfluters und dem maßgebenden Abfluss $Q_{\text{nach Mündung}}$ wird der zeitgleiche Wasserstand im Vorfluter ($WSP_{\text{Vorfluter}}$) an der Mündung ermittelt. Dieser dient als untere Randbedingung für die hydraulischen Berechnungen des Nebengewässers. Für die Berechnungen des Hauptgewässers wird die Mündungsformel nicht angewandt.

5.5 Sonstige Daten

Zusätzlich zu den im vorherigen beschriebenen Daten standen zur Bearbeitung Geodaten aus dem „Räumlichen Informations- und Planungssystem“ (RIPS) des Umweltinformationssystems Baden-Württembergs (UIS BW) zur Verfügung. Dies beinhaltet beispielsweise topografische Karten, Luftbildaufnahmen oder die automatisierte Liegenschaftskarte (ALK).

6 Erstellung von Hochwassergefahrenkarten im TBG 402

Im Rahmen dieser Arbeit wurden Hochwassergefahrenkarten für einen Teilabschnitt des Neckars, den Diessenerbach und den Talbach erstellt. Das folgende Kapitel beschreibt die für die hydraulische Simulation gewählten Modelleingangsparameter und dokumentiert die wesentlichen Ergebnisse der Überflutungsflächenermittlung. Die Überflutungssituation in den Ortslagen wird analysiert und die Leistungsfähigkeit von Brücken/Verdolungen bestimmt. Die Hochwassergefahrenkarten sind in Anlage E dargestellt. Die Darstellung der HWGK entspricht weitestgehend den beiden offiziellen Standarddarstellungen von Hochwassergefahrenkarten in Baden-Württemberg (siehe [7]). Der Kartentyp 1 stellt die Überflutungstiefen bei einem hundertjährigen Hochwasserereignis dar; der Kartentyp 2 die Flächenausbreitung für HQ_{10} , HQ_{20} , HQ_{50} , HQ_{100} und HQ_{ext} . Eine Übersicht aller vorhandenen Karten ergibt sich über das Anlagenverzeichnis.

6.1 Beschreibung des Untersuchungsgebiets

Der Neckar ist ein 367 km langer Nebenfluss des Rheins. Er entspringt auf der Baar, der Hochfläche zwischen Schwarzwald und Schwäbischer Alb, bei Villingen-Schwenningen und mündet bei Mannheim in den Rhein [2]. Im Rahmen der Erstellung von Hochwassergefahrenkarten wurde der Neckar in mehrere Teilbearbeitungsgebiete (TBG) untergliedert. Für die vorliegende Arbeit werden Hochwassergefahrenkarten aus einem Bereich des TBG 402, das den Oberlauf des Neckars einschließt, erstellt. Das Untersuchungsgebiet schließt direkt an das stromabwärts gelegene TBG 401 an. Alle untersuchten Gewässer gehören zum Verwaltungsbereich der Stadt Horb am Neckar, die sich am östlichen Rande des Nordschwarzwalds, ca. 40 km südwestlich von Stuttgart, befindet. Die untersuchten Gewässer umfassen eine 13,5 km lange Teilstrecke des Neckars (von Station km 68+245 bis km 81+788), die 72 km unterhalb dessen Quellgebiets beginnt, sowie zwei seitliche Zuflüsse, den Diessenerbach und den Talbach (siehe Abb. 6.1). Im Folgenden wird die untersuchte Teilstrecke des Neckars vereinfacht mit „Neckar“ bezeichnet, obwohl formal nicht die gesamte Fließstrecke des Neckar gemeint ist.

Der Neckar besitzt am Beginn des Betrachtungsgebiets (Station km 81+788), oberhalb der Ortschaft Dettingen, eine Einzugsgebietsfläche von 1050 km² und am Ende (Station km 68+244), oberhalb der Einmündung des Gewässers Eyach, eine Fläche von 1162 km². Er durchfließt die Ortschaft Dettingen, die Stadt Horb am Neckar, sowie die Ortschaft Mühlen. In Horb zweigt der 850 m lange Mühlkanal ab, der dem Neckar weiter unterhalb wieder zufließt. Der Mühlkanal ist nicht in die HWGK-Bearbeitung eingeschlossen.

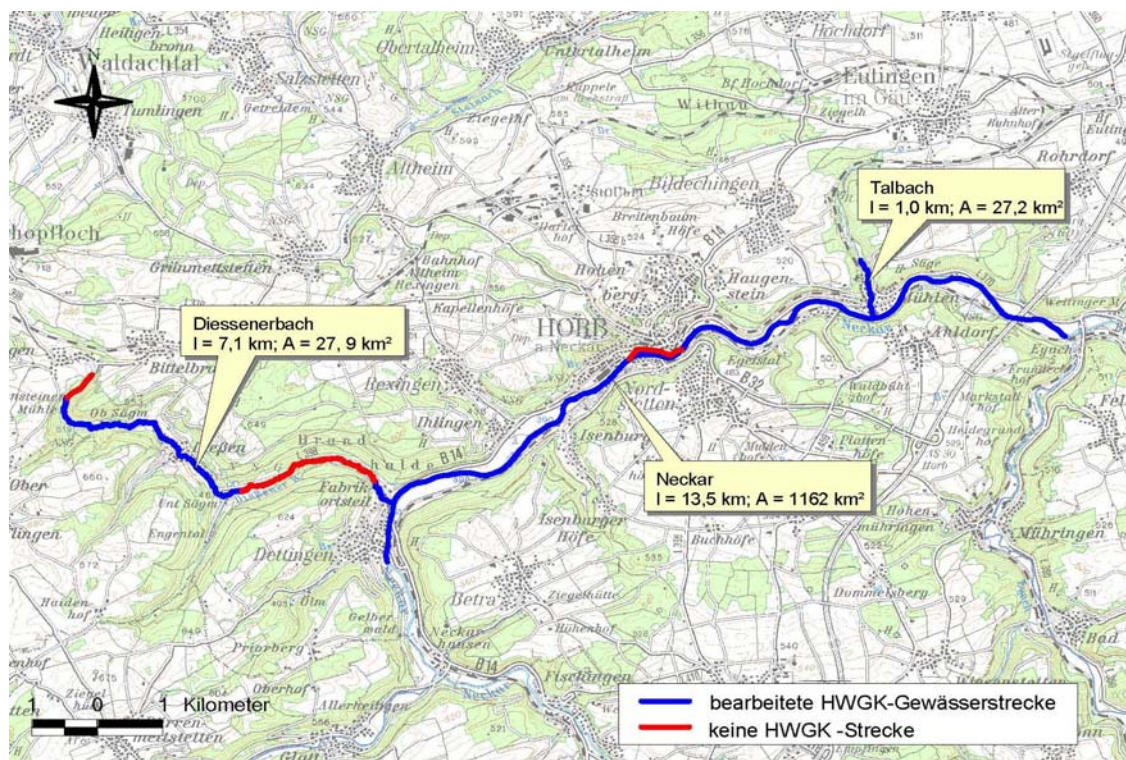


Abb. 6.1 Lage der Gewässer Neckar, Diessenerbach und Talbach

Der 7,6 km lange Diessenerbach mündet in der Ortschaft Dettingen in den Neckar und besitzt ein Einzugsgebiet von 27,9 km². In den ersten 0,5 km von seiner Quelle an, sowie oberhalb der Ortschaft Dettingen (von Gewässerstation 3+063 km bis Station 0+556 km) durchquert der Diessenerbach reines Waldgebiet ohne Bebauung. Diese Gewässerstrecken sind von der HWGK-Bearbeitung ausgenommen.

Der Talbach weist eine Einzugsgebietsgröße von 27,2 km² auf. Die zu bearbeitende Gewässerstrecke umfasst allerdings nicht den gesamten Talbach,

sondern beginnt nördlich von Mühlen und endet nach ca. 1,0 km an der Mündung, wo der Talbach in den Neckar entwässert.

Jedes der Gewässer besitzt eine offizielle eindeutige Identifikationsnummer (Gewässer-ID), die in Tab. 6.1 aufgelistet ist.

Tab. 6.1 Gewässer-ID der Gewässer Neckar, Diessenerbach und Talbach

Gewässername	Gewässer-ID
Neckar	02345
Diessenerbach	02086
Talbach	02093

6.2 Neckar

6.2.1 Beschreibung des Gewässers

Das Quellgebiet des Neckars liegt im Naturschutzgebiet Schwenninger Moos, südlich der Stadt Schwenningen. Nach einer Fließstrecke von 367 km mündet er bei Mannheim in den Rhein. Für die vorliegende Arbeit wird der Neckarabschnitt zwischen der Station 81+788 km (oberhalb von Dettingen) und der Station 68+244 km (oberhalb der Eyacheinmündung) betrachtet. Neben Dettingen (Abb. 6.2 a) durchquert der Neckar die Stadt Horb am Neckar (Abb. 6.2 b/c) sowie die Ortschaft Mühlen.

Der Neckar besitzt am Beginn des Betrachtungsgebiets eine Einzugsgebietsfläche von 1050 km² und am Ende eine Fläche von 1162 km². Im gesamten Einzugsgebiet (von der Quelle bis zur Eyacheinmündung) liegt der Bebauungsgrad bei 6,2 %, der Waldanteil bei 36,1 % und somit der Wiesen- und Ackerflächenanteil bei 57,7 %.



a) Station km 81+489: Ortslage Dettingen



b) Station km 80+760: Eisenbahnbrücke Horb



c) Station km 75+965: Ortslage Horb



d) Station km 69+653: uh. Mühlen

Abb. 6.2 Fotografische Aufnahmen des Neckars

Die mittlere Gewässerbreite beträgt ca. 30 m und variiert nur wenig. Das mittlere Sohlgefälle des untersuchten Gewässerabschnitts liegt bei 2,04 ‰, wobei 27,7 m Höhe überwunden werden. Im Allgemeinen existieren breite Vorländer. Ufer und Böschungen sind größtenteils mit Bäumen- und Sträuchern bewachsen (Abb. 6.2 d). Der Fluss wird durch einen mäandrierten Gewässerverlauf charakterisiert. Der untersuchte Gewässerabschnitt besitzt die typischen Eigenschaften eines Mäandertalgewässers (siehe [1]).

6.2.2 Maßgebende Abflüsse

Für die untersuchte 13,5 km lange Fließstrecke des Neckars können aus der Untersuchung zur Regionalisierung von Hochwasserabflüssen [8] die Hochwasserabflüsse an fünf Gewässerstellen abgeleitet werden. Zusätzlich wurden zu diesen Daten in den Mündungsbereichen dreier einleitender Gewässer HQ-Abflüsse nach 5.4.2 interpoliert: oberhalb von Horb aus dem Isenburger Tal, unterhalb der Einleitung des Mühlkanals in Horb, sowie unterhalb des Zuflusses aus dem Rohrdorfer Täle. Die Position aller hydrologischer Knoten ist auch dem Anlage 0 zu entnehmen. Die Lage der Einzugsgebiete der Knoten ist in Anlage C.1.1, die Berechnung der interpolierten HQ-Abflüsse in Anlage C.1.2 zu finden. In Tab. 6.2 sind alle maßgebenden HQ-Abflüsse erfasst.

Tab. 6.2 Maßgebende HQ-Abflüsse für den Neckar

Station [km]	Standort	Knotenart	HQ ₂ [m³/s]	HQ ₁₀ [m³/s]	HQ ₂₀ [m³/s]	HQ ₅₀ [m³/s]	HQ ₁₀₀ [m³/s]	HQ _{EXT} [m³/s]
80+763	uh. Diessenerbach	Regionalisierung	179,18	325,76	384,35	462,29	522,44	784,00
78+296	uh. Rexinger Bach	Regionalisierung	184,21	334,67	394,51	473,88	534,94	784,00
77+646	oh. Ortslage Horb	Interpolation	186,66	338,75	399,06	478,92	540,25	784,37
75+371	uh. Mühlkanal	Interpolation	190,07	344,42	405,38	485,91	547,63	784,88
74+447	Horb	Regionalisierung	190,90	345,80	406,92	487,61	549,42	785,00
73+837	uh. Egelstaler Bach	Regionalisierung	191,57	346,97	408,24	489,08	550,98	785,00
71+830	uh. Talbach	Regionalisierung	194,46	353,13	415,81	498,60	562,03	787,00
68+796	uh. Rohrdorfer Täle	Regionalisierung	195,84	354,95	417,67	500,43	563,78	789,54

6.2.3 Modellkalibrierung

Zur Kalibrierung des hydronumerischen Modells des Neckar standen innerhalb des Ortsbereichs der Stadt Horb drei Hochwassermarken zur Verfügung. Diese dokumentieren die jeweils höchsten Wasserstände des Hochwasserereignisses vom 15. Februar 1990. Über den Pegel Horb (Regionalisierungsknoten „Horb“), der sich 1 km unterhalb der Stadt Horb befindet, konnte den Hochwassermarken ein Scheitelabfluss zugewiesen werden.

Darüber hinaus liefert der Pegel selbst einen weiteren Wasserstand für die Modellkalibrierung:

- Scheitelabfluss am Pegel Horb (15.02.1990): $Q = 518 \text{ m}^3/\text{s}$
- Scheitelwasserstand am Pegel Horb (15.02.1990):
WSP = 389,06 m ü. NN

Mit Hilfe dieser Daten war es möglich, das Hochwasserereignis nachzurechnen und so das hydraulische Modell für den Bereich Horb zu kalibrieren. Die Kalibrierung erfolgte hauptsächlich über eine Variation der Rauigkeitskoeffizienten nach Gauckler/Manning/Strickler (k_{st}). So wurde letztendlich für den Gewässerschlauch eine Rauigkeit von $32 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$ und für die Vorländer ein k_{st} -Wert von $20 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$ angesetzt (siehe auch Kapitel 6.2.4). Das Ergebnis der Kalibrierung ist in Abb. 6.3 zu sehen. Die hydraulischen Rechenergebnisse stimmen mit den gemessenen Hochwasserständen an den drei Standorten mit Genauigkeiten von 3 cm, 8 cm und 11 cm überein.

**ABBILDUNG BLEIBT
UNVERÖFFENTLICHT!**

Abb. 6.3 Kalibrierung des hydraulischen Neckarmodells

6.2.4 Rauigkeiten

Eine Modellkalibrierung konnte aufgrund fehlender Daten nur für das Stadtgebiet Horb am Neckar durchgeführt werden. In anderen Bereichen wurden die Rauigkeiten anhand von Fotos abgeschätzt bzw. der Literatur entnommen. Für das Gerinne wurde außerhalb der Stadt Horb einheitlich ein k_{st} -Wert von $32 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$ gewählt. Für Gras bewachsene Vorländer wurde ein k_{st} -Wert von $25 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$ angesetzt. Bewaldete Vorländer besitzen einen k_{st} -Wert von $14,29 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$ bis $15,38 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$ ⁸. Alle übrigen Vorländer wurden einheitlich mit $k_{st} = 20 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$ belegt. Eine Übersicht aller angesetzten k_{st} -Werte für den Neckar ist in Tab. 6.3 gegeben.

⁸ Die ungeraden Zahlen entstehen dadurch, dass im Programm HEC-RAS nicht der k_{st} -Wert, sondern dessen Kehrwert, der sogenannten Manningbeiwert, eingegeben wird (z. B. $k_{st} = 14,29$ entspricht einem Manningbeiwert von 0,07).

Tab. 6.3 Stricklerbeiwerte für den Neckar

Station von [km]	Station bis [km]	Vorland links k_{st} [m ^{1/3} /s]	Gerinne k_{st} [m ^{1/3} /s]	Vorland rechts k_{st} [m ^{1/3} /s]
81+788	81+720	25	32	25
81+720	81+084	20	32	20
81+084	81+059	20	32	25
81+059	81+034	22	32	25
81+034	80+938	25	32	25
80+938	80+827	25	32	20
80+827	80+763	20	20	20
80+763	80+759	25	32	25
80+759	79+049	25	32	25
79+049	77+646	25	32	20
77+646	77+497	25	32	25
77+497	75+201	20	32	20
75+201	74+921	20	32	25
74+921	73+086	20	32	20
73+086	72+743	20	32	14.29
72+743	72+133	20	32	20
72+133	71+130	14.29	32	20
71+130	70+259	20	32	20
70+259	69+789	25	32	25
69+789	69+654	15.38	32	25
69+654	69+332	25	32	25
69+332	68+985	15.38	32	25
68+985	68+244	25	32	25

6.2.5 Hydraulische Randbedingungen

Das Ingenieurbüro Winkler und Partner GmbH, Stuttgart, ist für die Erstellung von Hochwassergefahrenkarten im TBG 401, das direkt unterhalb des hier betrachteten Untersuchungsgebiets liegt, zuständig. In einem Schreiben vom 16. September 2008 wurde von dem Ingenieurbüro Winkler und Partner GmbH, Stuttgart, vorläufig errechnete Wasserspiegel für die Station km 68+084, dem Übergabeprofil an TBG 401 an TBG 402, geliefert. Diese Wasserspiegelhöhen, die der Tab. 6.4 zu entnehmen sind, fungierten als untere Randbedingung für die hydraulische Modellierung des Neckar. Für den Fall schießender Abfluss-

verhältnisse am oberen Modellrand wurde als obere Wasserstandsrandbedingung Normalabflusstiefe mit einem Gefälle von 3 ‰ angesetzt.

Tab. 6.4 Untere Randbedingungen für den Neckar

Abflussereignis	Wasserstand [m ü. NN]
HQ ₂	371,98
HQ ₁₀	372,17
HQ ₂₀	372,33
HQ ₅₀	372,50
HQ ₁₀₀	372,72
HQ _{ext}	373,61

6.2.6 Ergebnisse

**ERGEBNISSE BLEIBEN
UNVERÖFFENTLICHT!**

6.3 Diessenerbach

6.3.1 Beschreibung des Gewässers

Der Diessenerbach entspringt südlich der Ortschaft Dettlingen und verläuft in westlicher Richtung. Das Bearbeitungsgebiet der HWGK beginnt ca. 500 m unterhalb seiner Quelle. Von dort an fließt er auf einer Länge von 7,1 km durch eine stark ländlich geprägte Region und ist wenig anthropogen beeinträchtigt (Abb. 6.6. a). Lediglich im Bereich der beiden Ortschaften Diessen und Mühlen ist eine Verbauung erkennbar. Hier überqueren mehrere Brücken den Bach und das Gewässerprofil ist durch Uferwände befestigt (Abb. 6.6 b, Abb. 6.6 d).

Das 27,9 km² große Einzugsgebiet des Diessenerbachs ist geprägt durch einen hohen Anteil an Wiesen und Äckern (65,0 %), einen Waldanteil von 32,3 % und einen niedrigen Bebauungsanteil von 2,7 %. Das Längsprofil weist, bedingt durch ein starkes Gefälle, zahlreiche Abstürze und Schwellen auf (Abb. 6.6 c). Das Gewässer überwindet einen Höhenunterschied von 132 m und besitzt ein mittleres Sohlgefälle von 19 ‰. Somit lässt es sich als Kerb- und Klammtalgewässer charakterisieren [1].

Aufgrund fehlender Bebauung ist der Diessenerbach von Gewässerstation km 3+063 bis Station km 0+556 von der HWGK-Bearbeitung ausgenommen (Waldstrecke). Da allerdings für den Diessenerbach auch in diesem Bereich durchgehend Vermessungsquerprofile vorlagen, konnte die Waldstrecke ebenfalls in die vorliegende Diplomarbeit, wenn auch mit vermindertem Genauigkeitsanspruch, aufgenommen werden.



a) Station km 6+347: Oberlauf



b) Station km 4+407: Ortslage Diessen



c) Station km 3+956: uh. Ortslage Diessen



d) Station km 0+156: Ortslage Dettingen

Abb. 6.6 Fotografische Aufnahmen des Diessenerbachs

6.3.2 Maßgebende Abflüsse

Für den Diessenerbach sind Scheitelwerte der Hochwasserabflüsse im Bereich des Quellgebiets und im Mündungsbereich aus der Regionalisierung (siehe [8]) bekannt. Die Scheitelabflüsse nehmen jedoch auf der gesamten Fließstrecke (7,1 km) um bis zu 129% zu. So beträgt beispielsweise der maximale Abfluss für eine 100-jährliches Hochwasserereignis im Quellgebiet $8,78 \text{ m}^3/\text{s}$ und im Mündungsbereich $20,12 \text{ m}^3/\text{s}$. Aus diesem Grund wurden an zwei Zwischenknoten, die direkt unterhalb der seitlichen Zuflussbäche im Engerstal und im Talweg liegen, manuell Einzugsgebietsflächen ermittelt, um HQ-Abflüsse nach Gl. 5.4 zu interpolieren.

Zusammenfassend sind alle HQ-Abflüsse, die für die HWGK-Erstellung am Diessenerbach relevant sind, in Tab. 6.6 aufgelistet. Im Anlage C.2.1 sind die

Einzugsgebiete in einer Übersichtskarte dargestellt. Die Berechnung der interpolierten Scheitelabflüsse kann im Einzelnen anhand Anlage C.2.2 nachvollzogen werden

Tab. 6.6 Maßgebende HQ-Abflüsse für den Diessenerbach

Station [km]	Standort	Knotenart	HQ ₂ [m ³ /s]	HQ ₁₀ [m ³ /s]	HQ ₂₀ [m ³ /s]	HQ ₅₀ [m ³ /s]	HQ ₁₀₀ [m ³ /s]	HQ _{EXT} [m ³ /s]
7+059	Quellgebiet	Regionalisierung	2,32	4,80	5,91	7,49	8,78	15,00
4+407	uh. NN (Talweg)	Interpolation	3,61	7,45	9,18	11,63	13,65	22,72
3+355	uh. Engerstal	Interpolation	4,68	9,67	11,91	15,10	17,72	29,18
0+557	Mündung	Regionalisierung	5,32	10,98	13,53	17,15	20,12	33,00

6.3.3 Rauigkeiten

Für den Diessenerbach lagen keine Hochwassermarken vor. Eine Kalibrierung anhand bekannter Hochwasserereignisse konnte folglich nicht vorgenommen werden. Rauigkeiten wurden auf der Grundlage von Fotos mit Hilfe von Literaturwerten ausgewählt. In Tab. 6.7 sind die gewählten k_{st} -Werte zusammengefasst. Die Vorländer besitzen in der Regel einen Rauigkeitsbeiwert von $20 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$. Für bewaldete Vorländer wurde der Rauigkeitsbeiwert auf $16,67 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$ verringert. Für das Gerinne wurde ebenfalls eine Rauigkeit von $20 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$ gewählt. Eine Ausnahme hiervon besteht innerhalb der Ortslage Dettingen, wo die Gerinnerauigkeit aufgrund des besseren Ausbauzustandes des Gewässers auf $25 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$ erhöht wurde.

Tab. 6.7 Stricklerbeiwerte für den Diessenerbach

Station von [km]	Station bis [km]	Vorland links k_{st} [m ^{1/3} /s]	Gerinne k_{st} [m ^{1/3} /s]	Vorland rechts k_{st} [m ^{1/3} /s]
7+059	6+697	20	20	20
6+697	6+568	20	20	16,67
6+568	3+480	20	20	20
3+480	3+388	20	20	16,67
3+388	1+223	20	20	20
1+223	0+301	16,67	20	16,67
0+301	0+253	16,67	25	16,67
0+253	0+022	20	25	20

6.3.4 Hydraulische Randbedingungen

Als untere Randbedingung zur hydraulischen Berechnung des Diessenerbachs werden die zeitgleich vorhandenen Wasserstände im Neckar bei einem T-jährlichen Hochwasserereignis im Diessenerbach angesetzt. Diese wurden nach der in Kapitel 5.4.3 beschriebenen Vorgehensweise abgeschätzt. Aus Tab. 6.8 können für verschiedene Hochwasserjährlichkeiten im Diessenerbach die abgeschätzten Abflüsse $Q_{\text{nach Mündung}}$ im Neckar sowie die zugehörigen Wasserspiegelhöhen $WSP_{\text{Vorfluter}}$ entnommen werden. Als Randbedingung am oberen Modellrand wurde die Normalabflusstiefe mit einem Gefälle von 20 ‰ angenommen.

Tab. 6.8 Untere Wasserstandsrandbedingungen für den Diessenerbach unter Anwendung der Mündungsformel

	$HQ_{\text{T Zufluss}}$ [m ³ /s]	$HQ_{\text{T Vorfluter vor Mündung}}$ [m ³ /s]	$HQ_{\text{T Vorfluter nach Mündung}}$ [m ³ /s]	$Q_{\text{nach Mündung}}$ [m ³ /s]	$WSP_{\text{Vorfluter}}$ [m ü. NN]
HQ ₂	5,32	177,30	179,18	57,84	396,54
HQ ₁₀	8,55	264,00	266,10	102,41	397,26
HQ ₂₀	10,98	323,51	325,76	135,06	397,47
HQ ₅₀	13,53	381,93	384,35	168,40	397,71
HQ ₁₀₀	17,15	459,62	462,29	214,31	397,95
HQ _{EXT}	20,12	519,53	522,44	250,80	398,46

hier: Vorfluter = Neckar, Zufluss = Diessenerbach

6.3.5 Ergebnisse

**ERGEBNISSE BLEIBEN
UNVERÖFFENTLICHT!**



Abb. 6.9 Einlauf kurze Verdolung uh. Hochbergstr



Abb. 6.10 Einlauf lange Verdolung uh. Hochbergstr.

6.4 Talbach

6.4.1 Beschreibung des Gewässers

Der Talbach entspringt westlich der Ortschaft Eutingen im Gäu. Er besitzt eine Gesamtlänge von 10,5 km und mündet unterhalb der Ortschaft Mühlen in den Neckar. Sein Einzugsgebiet beträgt 27,23 km², wobei der Bebauungsanteil bei 5,5 % und der Waldanteil bei 19,4 % liegt. Somit ist der Talbach vor allem durch einen hohen Acker- und Wiesenflächenanteil mit 75,1 % geprägt. Die Lage des Einzugsgebiets ist im Anlage C.3 dargestellt.

Die HWGK-Bearbeitung bezieht sich nur auf den letzten Kilometer Fließstrecke und beginnt ca. 500 m oberhalb der Ortschaft Mühlen. Dort weist der Talbach zunächst eine natürliche Gerinneform auf (Abb. 6.11 a). Innerhalb der Ortschaft Mühlen (ab Station km 0+490) verläuft der Talbach dann in einem offenen, rechteckigen Gerinne, wobei die Bebauung oft direkt bis an den Gewässerrand reicht (Abb. 6.11 b). Innerhalb der Ortslage wird der Talbach von drei Brücken überquert. Die letzten 150 m bis zur seiner Mündung beherrscht ein natürliches Trapezprofil das Erscheinungsbild (Abb. 6.11 c).

Zwischen dem Beginn der Gewässeruntersuchungsstrecke und der Einmündung in den Neckar überwindet der Talbach ein Höhendifferenz von 15 m, wobei sich 50 m oberhalb der Mündung ein Absturz von 2 m Höhe befindet (Abb. 6.11 d). Bis zu diesem Absturz liegt ein mittleres Sohlgefälle von

13 ‰ vor. Der Talbach lässt sich als Kerb- und Klammtalgewässer charakterisieren (siehe [1]).



a) Station km 0+602: oh. Ortslage Mühlen



b) Station km 0+420: Ortslage Mühlen



c) Station km 0+110: Ortslage Mühlen



d) Station km 0+047: Absturz, Ortslage Mühlen

Abb. 6.11 Fotografische Aufnahmen des Talbachs

6.4.2 Maßgebende Abflüsse

Für den Talbach können HQ-Abflüsse im Mündungsbereich aus dem Regionalisierungsverfahren in [8] entnommen werden (siehe Tab. 6.10). Da der Beginn der HWGK-Bearbeitung nur 1,0 km von der Mündung des Talbachs in den Neckar entfernt ist und auf dieser kurzen Fließstrecke keine relevanten seitlichen Zuflüsse vorhanden sind, werden diese Werte für die gesamte HWGK-Gewässerstrecke angesetzt.

Tab. 6.10 Maßgebende HQ-Abflüsse für den Talbach

Station [km]	Standort	Knotenart	HQ ₂ [m ³ /s]	HQ ₁₀ [m ³ /s]	HQ ₂₀ [m ³ /s]	HQ ₅₀ [m ³ /s]	HQ ₁₀₀ [m ³ /s]	HQ _{EXT} [m ³ /s]
1+045	Mündung	Regionalisierung.	2,72	5,53	6,82	8,66	10,18	17,00

6.4.3 Rauigkeiten

Da für den Talbach keine Hochwassermarken vorlagen, wurden die Rauigkeiten aufgrund von Literaturwerten ausgewählt. Eine Kalibrierung konnte nicht vorgenommen werden. In Tab. 6.11 sind die gewählten k_{st} -Werte zusammengefasst. Die Vorländer besitzen einen Rauigkeitsbeiwert von $20 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$. Für das Gerinne oberhalb der Ortslage Mühlen wurde ebenfalls eine Rauigkeit von $20 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$ angesetzt. Innerhalb der Ortslage wurde eine Rauigkeit von $27,78 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$ gewählt.

Tab. 6.11 Stricklerbeiwerte für den Talbach

Station von [km]	Station bis [km]	Vorland links k_{st} [m ^{1/3} /s]	Gerinne k_{st} [m ^{1/3} /s]	Vorland rechts k_{st} [m ^{1/3} /s]
1+045	0+489	20	20	20
0+489	0+035	20	27,78	20

6.4.4 Hydraulische Randbedingungen

Die angesetzten unteren Randbedingungen (Wasserstand $WSP_{Vorfluter}$ im Neckar bei Ablauf eines T-jährlichen Hochwasserereignisses) für die hydraulischen Berechnungen des Talbachs wurden, wie in Kapitel 5.4.3 beschrieben, ermittelt. Für die verschiedenen Hochwasserjährlichkeiten im Talbach können die Abflüsse $Q_{nach \text{ Mündung}}$ im Neckar sowie die zugehörigen Wasserspiegelhöhen $WSP_{Vorfluter}$ der Tab. 6.12 entnommen werden. Als Wasserstandsrandbedingung am oberen Modellrand (im Falle schießenden Abflusses) wurde die Normalabflusstiefe mit einem Gefälle von 27 ‰ angesetzt.

Tab. 6.12 Untere Wasserstandsrandbedingungen für den Talbach unter Anwendung der Mündungsformel

	HQ _T Zufluss [m ³ /s]	HQ _T Vorfluter vor Mündung [m ³ /s]	HQ _T Vorfluter nach Mündung [m ³ /s]	Q _{nach Mündung} [m ³ /s]	WSP _{Vorfluter} [m ü. NN]
HQ ₂	2,72	192,15	194,46	37,01	377,08
HQ ₁₀	5,53	348,62	353,13	103,16	377,99
HQ ₂₀	6,82	410,37	415,81	132,67	378,31
HQ ₅₀	8,66	491,90	498,60	173,65	378,68
HQ ₁₀₀	10,18	554,34	562,03	206,43	378,95
HQ _{EXT}	17,00	785,00	787,00	334,51	379,73

hier: Vorfluter = Neckar, Zufluss = Talbach

6.4.5 Ergebnisse

**ERGEBNISSE BLEIBEN
UNVERÖFFENTLICHT!**

7 Entwicklung einer neuen Methodik zur Querprofilerzeugung unter Nutzung hochaufgelöster digitaler Geländemodelle

7.1 Problemstellung

In der hydrodynamischen, eindimensionalen Wasserspiegellagenberechnung wird die Topografie des Gerinnes und der abflusswirksamen Vorländer mit Hilfe von rechtwinklig zur Strömung angelegten Querprofilen beschrieben. Zur Erstellung dieser Querprofile werden Geländehöhen benötigt. Prinzipiell eignen sich hierfür folgende Informationsquellen [19]:

- Digitales Geländemodell/Digitales Höhenmodell
- Topografische Karten (Deutsche Grundkarte, Höhenflurkarten, etc.)
- Terrestrische Querprofil-, Bauwerks- und Geländevermessungen

Zur Ermittlung von Überschwemmungsflächen hat sich in der Praxis eine Kombination von Geländehöhen aus dem digitalen Geländemodell und aus terrestrischen Vermessungen durchgesetzt. In Baden-Württemberg wird dieses Verfahren auch für die Erstellung von HWGK angewandt.

Die Daten des DGMs werden durch Laserscannerbefliegungen gewonnen. Hierbei wird die Erdoberfläche durch aus einem Flugzeug gesendete Laserimpulse abgetastet. Die Impulse werden von der Erdoberfläche und deren Objekte reflektiert. Durch Empfang des reflektierten Strahls und Messung der Laufzeit des Laserimpulses wird die Entfernung zwischen dem Laser und der Geländeroberfläche und damit die Geländehöhe bestimmt. Mit diesem Verfahren können jedoch keine Geländepunkte aufgenommen werden, die sich unterhalb von Wasseroberflächen befinden. Laserstrahlen werden beim Auftreffen auf die Wasseroberfläche reflektiert und erreichen so tieferliegende Punkte nicht. Bei einer reinen Ableitung der Höhendaten aus dem DGM ist folglich, wie auch in Abb. 7.1 zu sehen, der Flussschlauch unzureichend abgebildet.

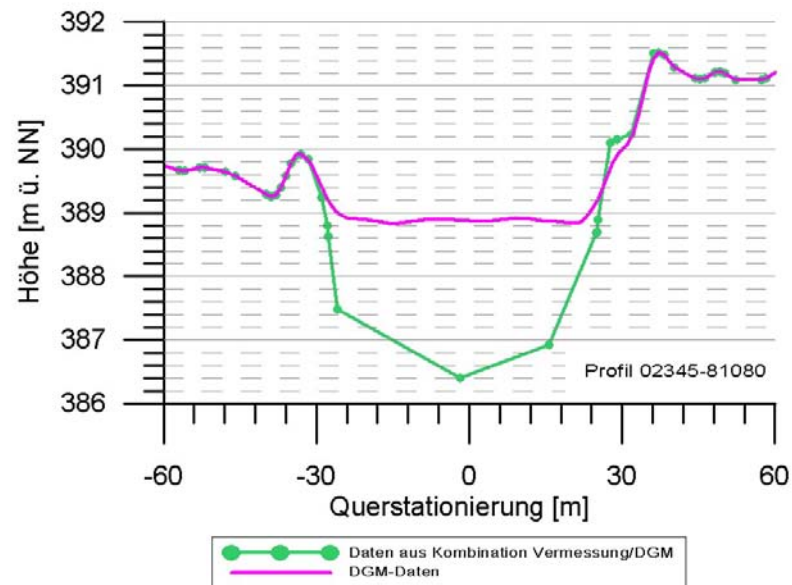


Abb. 7.1 fehlerhafte Geländehöhen in einem DGM-Querprofil des Neckars

Oftmals kommt es vor, dass nach Durchführung der Vermessungsarbeiten zusätzliche Querprofile benötigt werden, um die Genauigkeit der Wasserspiegellagenberechnung zu erhöhen. Dies trifft z. B. dann zu, wenn der Vermessungsabstand zwischen zwei Profilen zu groß gewählt wurde. Eine nachträgliche Vermessung einzelner Profile ist aber oftmals aus ökonomischer Sicht nicht praktikabel. Die fehlenden Geländehöhen werden entweder alleinig aus dem digitalen Geländemodell abgeleitet, oder durch Interpolation zwischen zwei Querprofilen gewonnen, die aus der Kombination Vermessung/DGM vorliegen. Beide Verfahren nutzen die zur Verfügung stehenden Daten nicht optimal aus.

Der alleinige Schnitt aus dem digitalen Geländemodell führt zwangsläufig zu Problemen im Bereich des Gewässerbetts, da Höhen unterhalb der Wasseroberfläche im DGM nicht korrekt abgebildet werden. Höheninformationen der ober- und unterstrom gelegenen Vermessungsprofile werden nicht zur Verbesserung der Profilerzeugung genutzt.

Bei der Interpolation von Zwischenprofilen, wie sie beispielsweise mit HEC-RAS durchgeführt werden kann (siehe Kapitel 4.3), stellt das interpolierte Zwischenprofil immer lediglich eine Art Mittelwert dar und spiegelt i.d.R. nie genau die tatsächlichen Höhenverhältnisse vor Ort wider. Zumindest im Bereich der

Vorländer liegen aber auch zwischen den Querprofilen relativ genaue Höheninformationen durch das flächendeckende DGM vor, die bei der reinen Interpolation nicht genutzt werden.

Ein weiterer Nachteil einfacher Interpolationsmethoden liegt darin, dass Ausdehnung und Lage der interpolierten Profile zumeist nur durch die Ausdehnung und Lage der beiden Randprofile, zwischen denen interpoliert wird, bestimmt wird. Die Lage im Bezug zur Gewässerachse, bzw. die tatsächliche Ausdehnung des Überschwemmungsgebiets, findet keine Berücksichtigung. Dies kann beispielsweise in Bereichen von starken Gewässerkrümmungen (Abb. 7.2a) oder bei unregelmäßiger Ausdehnung von Überschwemmungsflächen (Abb. 7.2b) zu Fehlern führen. Besonders bemerkbar machen sich diese Fehler bei der Erstellung des Rasters der Wasseroberfläche im Anschluss an die hydraulischen Berechnungen (siehe Kapitel 2.2 und Kapitel 3.3), das zur Ermittlung der Überflutungsflächen benötigt wird. Deckt das generierte Wasserspiegelraster aufgrund der interpolierten Zwischenprofile nicht mehr vollständig die tatsächliche Überflutungsfläche ab, so ist eine korrekte Bestimmung der gesamten Überflutungsfläche ohne manuelle Nachbearbeitung nicht mehr möglich.

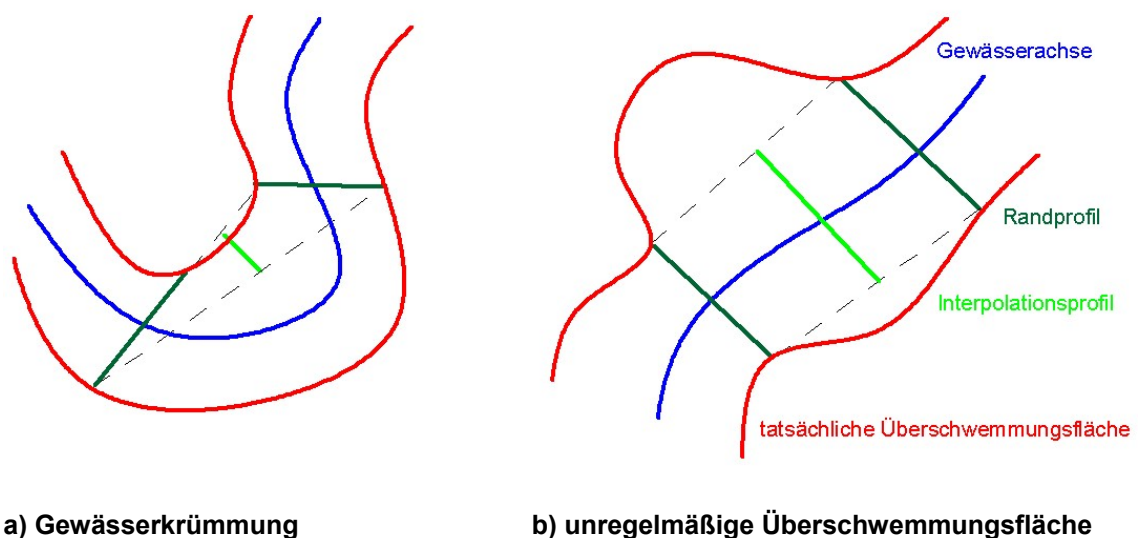


Abb. 7.2 mögliche Fehler bei der Interpolation von Zwischenprofilen

Es wird folglich ein Verfahren zur Erstellung von Querprofilen benötigt, das keines der oben genannten Nachteile besitzt und die zur Verfügung stehenden Höheninformationen aus Laserscannerbefliegung und terrestrischer Vermessung optimal ausnutzt. Dieses Verfahren lässt sich nicht nur zur Erzeugung von einzelnen Zusatzprofilen verwenden. Es ist denkbar, solch ein Verfahren zukünftig auch in größerem Stile zur Querprofilerstellung einzusetzen, um auf diese Weise die aufwendige und kostspielige terrestrische Vermessung auf ein Minimum zu beschränken. Dieser Aspekt ist Gegenstand des Kapitels 8.

7.2 Lösungsansatz

Wie im vorherigen Abschnitt beschrieben, sind reine DGM-Profile, also Profile deren Höhendaten nur aus dem DGM gewonnen wurden, im Bereich des Gewässerschlauchs fehlerbehaftet. Querprofile, die aus Randprofilen interpoliert wurden, nutzen demgegenüber nicht die ziemlich genauen, relativ fehlerfreien Höheninformationen aus dem DGM im Bereich der Vorländer und erfassen eventuell in ihrer Lage und Ausdehnung nicht die gesamte potentielle Überschwemmungsfläche.

Aus diesem Grund liegt es nahe, die beiden oben beschriebenen Verfahren so zu kombinieren, dass die jeweiligen Nachteile aufgehoben sind. Dies bedeutet, dass zur Querprofilerzeugung, soweit möglich, die exakten Höhendaten aus dem DGM herangezogen werden sollen. Nur in den Bereichen, wo diese fehlerhaft sind, ist es sinnvoll interpolierte Geländehöhen zu verwenden.

Um die fehlerfreien Daten von den fehlerbehafteten in den DGM-Profilen so exakt wie möglich voneinander trennen zu können, muss hierzu ein geeignetes Kriterium gefunden werden. Beim visuellen Vergleich von reinen DGM-Profilen und den zugehörigen Querprofilen aus der Kombination Vermessung/DGM wird deutlich, dass DGM-Fehler in der Regel nur im Bereich der Wasseroberfläche auftreten. Die Uferböschungen werden in den meisten Fällen recht gut wiedergegeben. Als Trennkriterium eignet sich eine Höhe, unterhalb dieser die Geländehöhen durch Interpolationshöhen ersetzt werden. Wie auch aus Abb. 7.3 ersichtlich, ist im Regelfall davon auszugehen, dass Geländehöhen über dem vermessenen Wasserspiegel zuzüglich einer Höhe von 0,5 m korrekt

sind. Der Wert von 0,5 m ist ein beliebiger Wert, der sich jedoch aufgrund zahlreicher visueller Vergleiche als passend erwiesen hat.

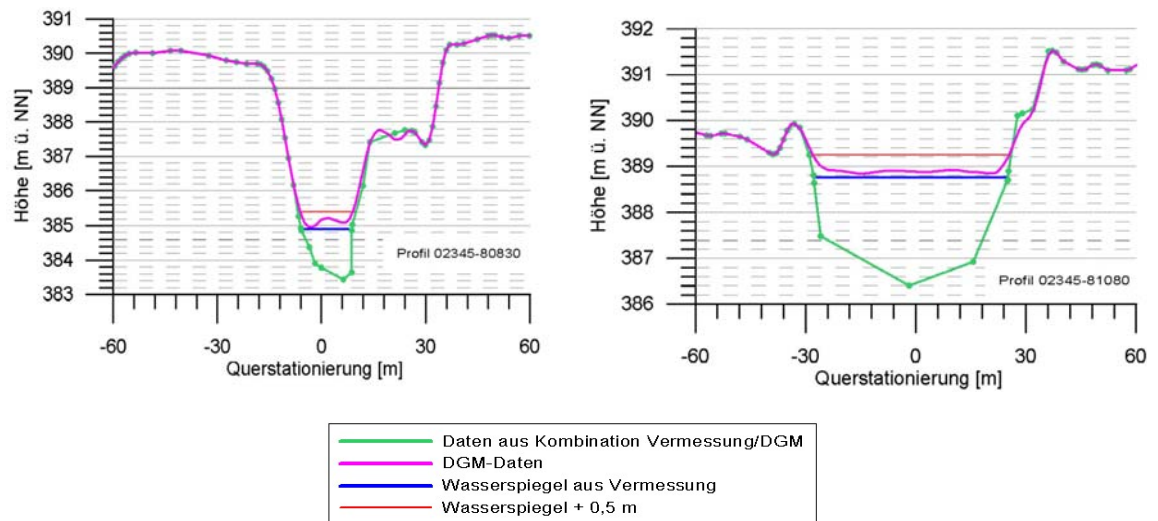


Abb. 7.3 Vergleich von DGM-Querprofilen und DGM/Vermessungsprofilen am Neckar

Standardmäßig werden für alle Vermessungen im Zuge der HWGK die Wasserspiegel in den Querprofilen mitvermessen. Somit kann der Wasserspiegel an den Zusatzprofilen aus den benachbarten Profilen interpoliert werden. Oberhalb der Referenzhöhe, die sich aus dem interpolierten Wasserstand zuzüglich des gewählten Puffers von 0,5 m ergibt, werden die Höheninformationen des Zwischenprofils aus dem DGM abgeleitet, unterhalb davon über Interpolation ermittelt.

Zur Interpolation der Geländehöhen unterhalb der Referenzhöhe wird ein Lamellenverfahren vorgeschlagen. Eine Prinzipskizze liegt in Abb. 7.4 vor.

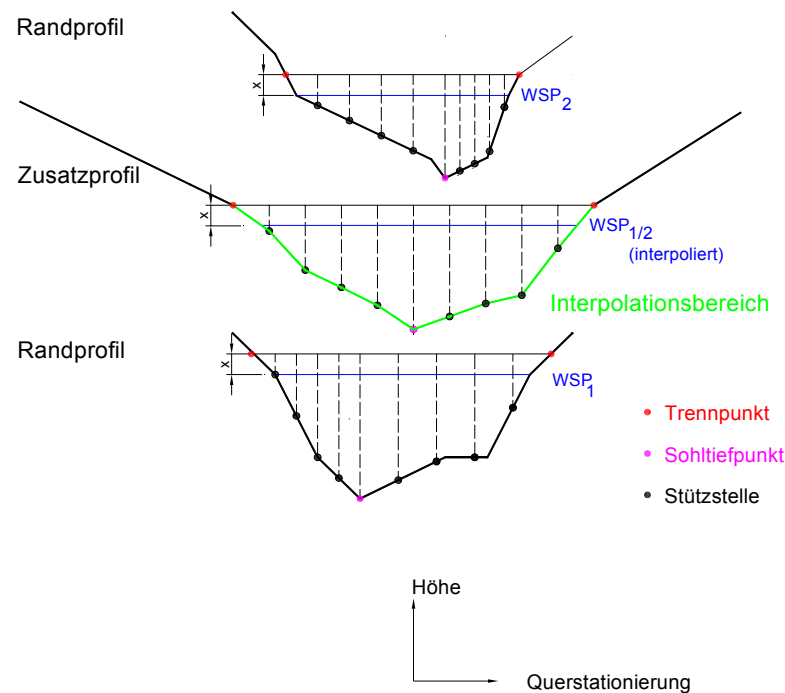


Abb. 7.4 Prinzipskizze zur Interpolation von Zusatzprofilen

Das Lamellenverfahren besteht aus folgenden Schritten:

- Ermittlung der Trennpunkte: Für die Randprofile (Profile zwischen den interpoliert wird) und das Zusatzprofil werden jeweils die beiden Schnittpunkte (Trennpunkte) rechts und links der Gewässerachse mit der jeweiligen Wasserspiegelhöhe zzgl. einer vorzugebenden Höhe „ x “ (Empfehlung $x = 0,5$ m) berechnet.
- Interpolation des Sohlteiefpunkts im Zusatzprofil: Ausgehend von den Sohlteiefpunkten der Randprofile wird der Sohlteiefpunkt im Zusatzprofil interpoliert. Dabei findet eine lineare Interpolation der Höhen und der Querstationierung statt. Maßgebend für die Querstationierung des Sohlteiefpunkts sind die prozentualen Abstände zu den Trennpunkten. Durch die separate Interpolation des Sohlteiefpunktes im Zwischenprofil wird gewährleistet, dass im Bereich der Interpolationsstrecke keine Höhengsprünge der Tiefenlinie auftreten (Höcker im WSP-Längsschnitt).

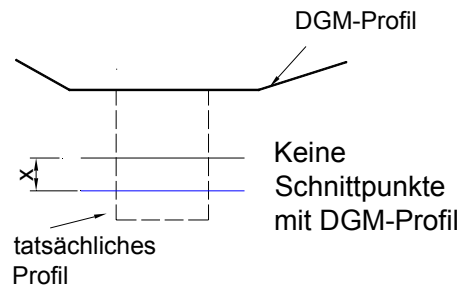
- Lamellenaufteilung zur Ermittlung der Stützstellen: Die Randprofile und das Zusatzprofil werden jeweils in eine gleiche Anzahl von Lamellen aufgeteilt. Die Anzahl der Lamellen berechnet sich aus einem vorzugebenden Lamellenabstand für das Zusatzprofil. Die Gerinnebereiche rechts und links vom Sohltiefpunkt werden bei der Festlegung der Lamellen separat betrachtet. Durch die Aufteilung der Randprofile und des Zusatzprofils in Lamellen ergeben sich an allen Profilen in gleicher Zahl über den Querschnitt verteilte Querprofilstützstellen.
- Interpolation der Geländehöhen: Die Geländehöhen des Zusatzprofils berechnen sich an allen Querprofilstützstellen aus einer linearen Höheninterpolation der zugehörigen Randprofilstützstellen.

Die oben beschriebene Interpolationsmethode hat den Vorteil, dass Gewässerverengungen bzw. Aufweitungen, die aus dem DGM hervorgehen, bei der Erzeugung des Zusatzprofils unmittelbar berücksichtigt und wiedergegeben werden können. Dies beruht auf der Tatsache, dass nur im Bereich zwischen den Trennpunkten interpoliert wird. Außerhalb der Trennpunkte bleiben die DGM-Daten erhalten. Die Trennpunkte stellen die Schnittpunkte zwischen DGM-Profil und Wasserspiegelhöhe zzgl. einer Höhe „x“ dar und befinden sich in der Regel im Bereich der Uferböschungen. Die Lage der Uferböschungen in den DGM-Profilen ist abhängig von der tatsächlichen Gewässerbreite am Ort des DGM-Profils und unabhängig von den Randprofilen.

Grundvoraussetzung für die Anwendung der Interpolationsmethode ist die Möglichkeit zur Ermittlung der Trennpunkte. Probleme können insbesondere dann auftreten, wenn der Schnitt des Wasserspiegels zuzüglich des Sicherheitspuffers „x“ auf einer Seite der Profile zu keinem Schnittpunkt mehr führt oder sich unter Umständen auch mehrere Schnittpunkte im Bereich der Uferböschung ergeben. Zudem besteht die Gefahr, dass die linken und rechten Trennpunkte, die den Interpolationsbereich definieren, zu weit vom Gewässer entfernt liegen. In diesem Fall wird der zu interpolierende Bereich unnötig groß gewählt und fehlerfreie DGM-Daten werden nicht hinreichend genutzt. Die prinzipiell mögliche Genauigkeit geht damit verloren. Als problematisch

erweisen sich hierbei vor allem sehr steile Uferabbrüche und Ufermauern (Abb. 7.5a), bzw. Staubereiche, in denen der Normalwasserspiegel oft nur knapp unter den Böschungsoberkanten liegt (Abb. 7.5b).

a) enges Gewässer mit steilen Ufern



b) Gewässer im Staubereich

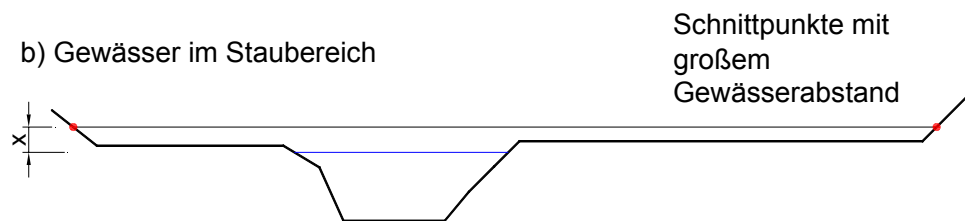


Abb. 7.5 mögliche Probleme bei der Interpolation von Zusatzprofilen

Kann der Interpolationsbereich des Zusatzprofils nicht mehr über die Trennpunkte als Schnittpunkte des DGM-Profiles mit der Wasserspiegelhöhe zzgl. der Höhe „x“ bestimmt werden, so bietet es sich an, die Trennpunkte im Zusatzprofil über die Querstation zu ermitteln. Die Höhe der interpolierten Trennpunkte ist weiterhin die Wasserspiegelhöhe zzgl. „x“. Die Querstationierung der Trennpunkte jedoch wird aus der Querstationierung der Randprofiltrennpunkte interpoliert. Die Anwendung dieser Methode hat den Nachteil, dass der gewählte Interpolationsbereich von der Lage der Gewässerachse abhängig ist, die nicht immer genau sein muss. Zudem kann keine Berücksichtigung von Gewässerverengungen bzw. Aufweitungen stattfinden. Trotz allem werden die erzeugten Profile eher der Realität entsprechen, als mit einer Erzeugung aus reinen DGM-Daten bzw. aus einer reinen Interpolation.

Fälle, in denen auch in den Randprofilen keine passablen Trennpunkte vorhanden sind, werden von beiden Methoden nicht erfasst.

7.3 Umsetzung im XS-Creator

Das oben erläuterte Verfahren, mit dem man Zusatzprofile aus einer Kombination von DGM-Höhen und interpolierten Höhen erzeugen kann, sollte möglichst so in den Arbeitsablauf zur Überflutungsflächenenermittlung integriert werden, dass deren Anwendung für den zuständigen Bearbeiter keinen großen Mehraufwand bedeutet. In den einzelnen Ingenieurbüros ist der Arbeitsablauf jedoch anders gestaltet, da z. B. mit unterschiedlicher Software gearbeitet wird. Im Folgenden wird eine Möglichkeit beschrieben, die speziell auf den Arbeitsablauf des Ingenieurbüros WALD + CORBE, Hügelsheim, zugeschnitten ist. Prinzipiell sind auch andere Umsetzungsmöglichkeiten denkbar.

Die Mitarbeiter von WALD + CORBE nutzen zur Erstellung von Querprofilen die firmeninterne ArcView GIS – Erweiterung „XS-Creator“, die in Kapitel 3.2 beschrieben ist. Es bot sich an, die Erzeugung von Zusatzprofilen an dieses Programm anzulehnen. Aus diesem Grund wurde der XS-Creator durch das Programm „XS-Zusatzprofile“ ergänzt. Der Quellcode kann der beigefügten CD entnommen werden. Das Programm, geschrieben in der Makrosprache Avenue, besteht aus vier Teilprogrammen: Zusatzprofile erzeugen (I), Wasserspiegel ermitteln (II), Wasserspiegel interpolieren (III) und Gewässerschlauch interpolieren und einmischen (IV).

Alle Programmteile sind direkt über die Menüleiste von ArcView GIS aufrufbar (siehe Abb. 7.6). Sie können jedoch nicht eigenständig benutzt werden, sondern sind nur in Zusammenhang mit dem XS-Creator anwendbar, da sie dessen Ergebnisse direkt nutzen. In Abb. 7.7 ist der Programmablauf im Bezug auf den XS-Creator dargestellt.

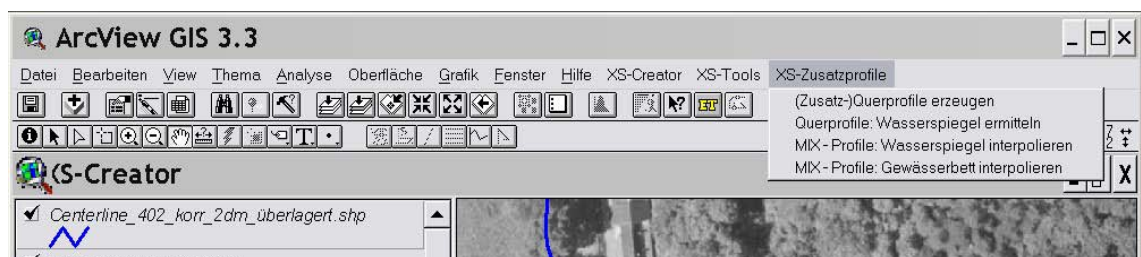


Abb. 7.6 Menü-Leiste im ArcView GIS mit XS-Zusatzprofile

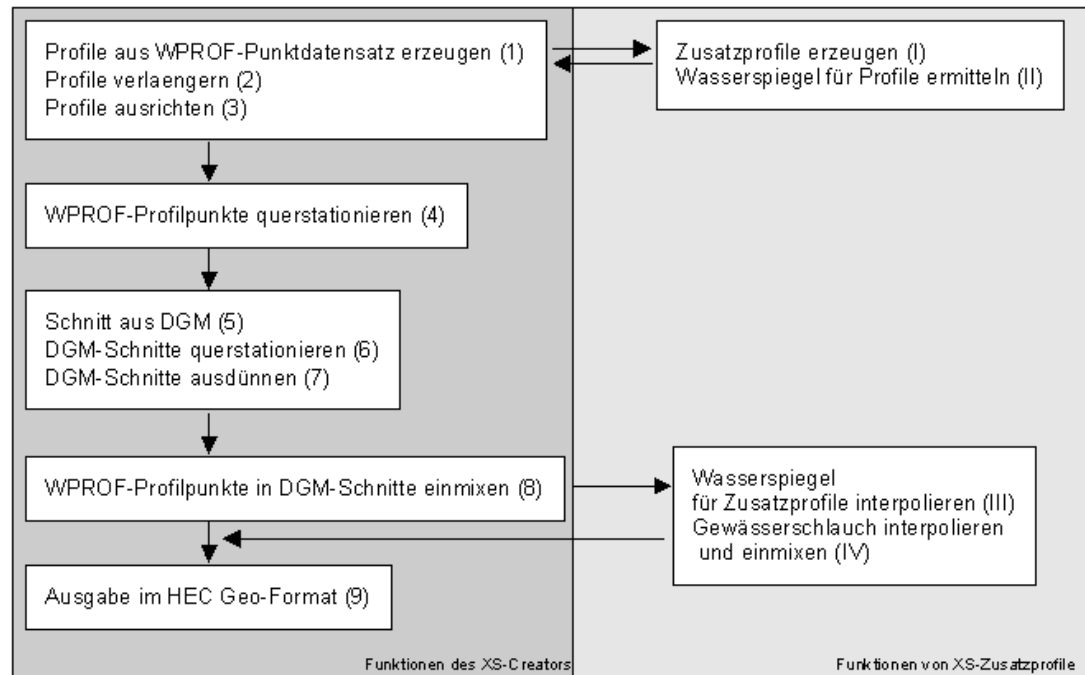
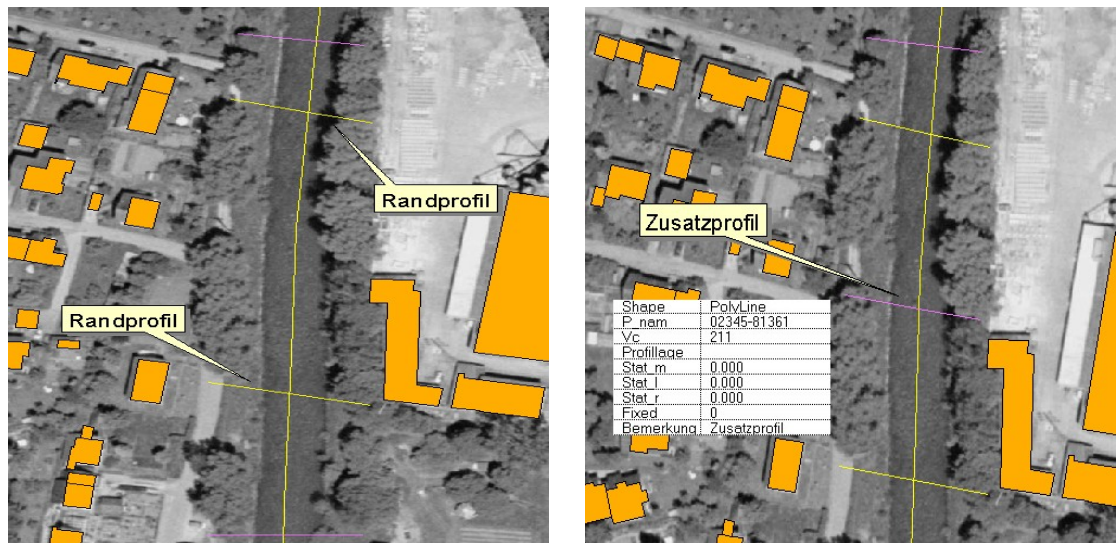


Abb. 7.7 Ablaufschema von XS-Zusatzprofile und dem XS-Creator

Zusatzprofile erzeugen (I)

Nachdem der Bearbeiter mit dem XS-Creator aus den Vermessungspunkten Lagelinien der Querprofile erzeugt hat, kann er den Menüpunkt „Zusatzprofile erzeugen“ im Programm XS-Zusatzprofile aufrufen. Zunächst selektiert er zwei Randprofile, zwischen denen Zusatzprofile erzeugt werden sollen, sowie die dazugehörige Gewässerachse. Durch manuelle Eingabe des gewünschten Maximalabstands zwischen den Profilen werden dann automatisch die passende Anzahl Zwischenprofile, zunächst als einfache Lagelinien, erzeugt. In Abb. 7.8 ist die Erzeugung eines Zusatzprofils dargestellt. Durch Wahl eines kleineren Maximalabstands könnten auf diese Weise jedoch auch mehrere Zusatzprofile zwischen den Randprofilen erzeugt werden. Um auch zwischen anderen Randprofilen Zusatzprofile zu erstellen, kann das Teilprogramm „Zusatzprofile erzeugen“ beliebig oft aufgerufen und wiederholt werden.



Selektion zweier Randprofile und der Gewässerachse

Zusatzprofil wurde erzeugt

Abb. 7.8 XS-Zusatzprofile: „Zusatzprofile erzeugen“

Wasserspiegel ermitteln (II)

Direkt im Anschluss an den Menüpunkt „Zusatzprofile erzeugen“ wählt der Bearbeiter den Menüpunkt „Wasserspiegel ermitteln“. Das Programm greift auf den WPROF-Punktdateisatz aller vorhandenen Vermessungspunkte zu. Jedem Gewässerprofil werden die vermessenen Wasserspiegel in Form von Attributen zugewiesen (siehe Abb. 7.9). Das WPROF-Format sieht vor, dass der Wasserspiegel sowohl an dem linken, als auch an dem rechten Ufer vermessen wird. Aus diesem Grund wird zusätzlich ein mittlerer Wasserspiegel ausgegeben, der als Grundlage für alle weiteren Berechnungen dient. Da für die Zusatzprofile keine vermessenen Wasserspiegel vorliegen, bleiben diese von dem Programmpunkt unberührt. Nach Ermittlung der Wasserspiegel wechselt der Bearbeiter zurück in den XS-Creator.



Abb. 7.9 XS-Zusatzprofile: „Wasserspiegel ermitteln“

Wasserspiegel interpolieren (III)

Mit dem XS-Creator hat der Bearbeiter nun die Profillagen verlängert und senkrecht zur Fließrichtung ausgerichtet, sowie aus den Profillagen DGM-Schnitte erstellt. Für die Gewässerprofile wurden im Gewässer- und Uferbereich die DGM-Daten durch die vorhandenen Vermessungsdaten ersetzt. Die Zusatzprofile bestehen weiterhin aus reinen DGM-Daten.

Nun werden die bislang fehlenden Wasserspiegel an den Zusatzprofilen interpoliert. Es wird hierbei eine lineare Interpolation auf Grundlage der vermessenen Wasserspiegel der Randprofile durchgeführt. Der interpolierte Wasserspiegel wird den Zusatzprofilen als Attribut angehängt (siehe Abb. 7.10).



Abb. 7.10 XS-Zusatzprofile: „Wasserspiegel interpolieren“

Gewässerschlauch interpolieren und einmischen (IV)

Bis zu diesem Zeitpunkt bestehen die Zusatzprofile rein aus Geländehöhen des digitalen Geländemodells. Durch Aufrufen des Menüpunkts „Gewässerschlauch interpolieren und einmischen“ werden fehlerhafte Geländehöhen nun durch interpolierte Geländehöhen ersetzt. Der Nutzer kann dabei manuell festlegen in welcher Höhe „x“ über dem Wasserspiegel die Trennung in DGM-Daten und interpolierten Daten erfolgen soll. Es werden die in Kapitel 7.3 erläuterten Interpolationsmethoden angewandt. Die Unterscheidung, welche Interpolationsmethode benutzt wird, geschieht automatisch nach formalen Kriterien. In Abb. 7.11 ist ein Vergleich des reinen DGM-Profils, also vor Anwendung des Menüpunktes „Gewässerschlauch interpolieren und einmischen“ und des mit dem Programm XS-Zusatzprofile erzeugten Profils zu sehen. Das interpolierte und neu hinzugefügte Gewässerbett, das in dem DGM-Profil nicht enthalten war, ist gut zu erkennen.

Die Ausgabe der Zusatzprofile im HEC-RAS-Format erfolgt zusammen mit allen anderen Profilen durch den XS-Creator.

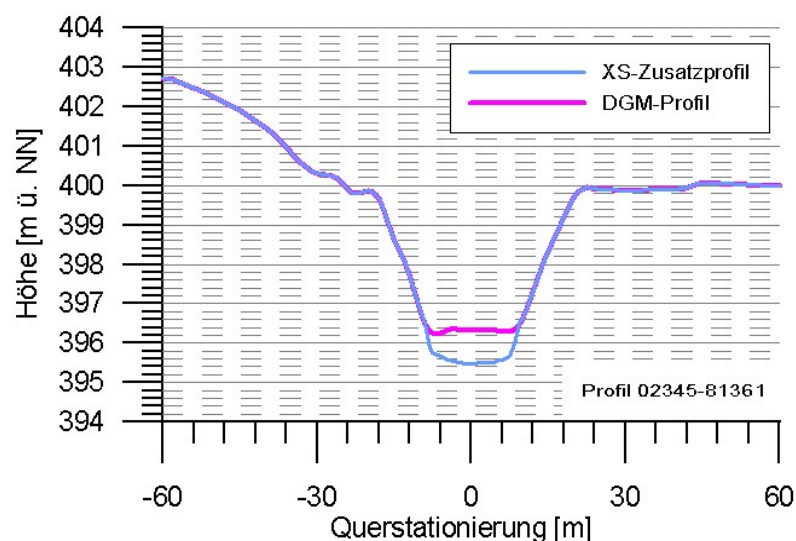


Abb. 7.11 Vergleich von DGM-Profil und dem Profil aus XS-Zusatzprofile

8 Untersuchung zur Minimierung des Vermessungsaufwands

8.1 Problemstellung

In der eindimensionalen, hydraulischen Fließgewässermodellierung repräsentieren Querprofile die geometrischen Verhältnisse in und neben dem Gewässer. Zur Erstellung von Hochwassergefahrenkarten werden diese Profile einheitlich aus einer Kombination von DGM-Daten und einer terrestrischen Vermessung des Gewässers gewonnen. Da DGM-Daten flächendeckend vorliegen und damit an beliebiger Stelle zur Profilverlängerung herangezogen werden können, richtet sich die Anzahl der verfügbaren Querprofile nach der Anzahl der vermessenen Querprofile. Die Qualität der Berechnungen ist dadurch stark durch den Umfang der terrestrischen Vermessung geprägt.

Für den optimalen Querprofilabstand gibt es keine einheitliche und klare Regelung. Die Abstände müssen an die jeweilige Gewässersituation angepasst werden. Von Bedeutung sind hierbei Krümmungen, größere Sohl- und Wasserspiegeländerungen, Ein- und Ausleitungen, sowie Stellen an denen sich Geometrie, Morphologie und Bewuchs erheblich verändern [9]. In der Praxis werden jedoch an größeren Gewässern im Außenbereich mittlere Profilabstände von 100 bis 200 m gewählt. An kleineren Gewässern und innerhalb von bebauten Gebieten sind die Abstände i. d. R. deutlich enger. Zusätzlich zu den Gewässerprofilen erfolgt eine Vermessung der Bauwerke, insbesondere der Querbauwerke wie Brücken, Abstürze, Wehre und Verdolungen.

Die Kosten der Vermessung belaufen sich durchschnittlich auf 35 € pro Gewässerprofil und 50 € pro Bauwerksprofil [13]. Diese Preise beziehen sich auf die Kosten der Vermessung im Rahmen der HWGK-Erstellung Baden-Württemberg. Durch die große Anzahl aufzunehmender Profile konnten hier die üblichen Preise für ein Profil um bis zu 50 % reduziert werden.

Für eine Gewässerstrecke von einem Kilometer und einem durchschnittlichen Profilabstand von 150 m fallen folglich für die Vermessung der Gewässerprofile Kosten von 234 € an. In Baden-Württemberg werden für ca. 12.500 km Gewässer Hochwassergefahrenkarten erstellt. Unter den oben getroffenen Annahmen lägen die Vermessungskosten für die Gewässerprofile damit bei 2.935.000 €. Unter der Annahme, dass zudem pro Kilometer Fließstrecke je ein Bauwerk zu vermessen ist, würden sich die Gesamtkosten auf 3.550.000 € belaufen. Die grobe Kostenabschätzung berücksichtigt noch nicht, dass viele Gewässerstrecken zu den kleineren Gewässern zählen und/oder innerhalb von bebauten Gebieten liegen, wodurch sich über weite Strecken geringere Vermessungsabstände und damit höhere Kosten ergeben. Anhand der Hochwassergefahrenkarten wird deutlich, welches Einsparpotential grundsätzlich auch bei günstigen Vermessungspreisen potentiell noch in der terrestrischen Vermessung steckt.

Durch Reduzierung der terrestrischen Vermessung ließen sich die Kosten minimieren. Es stellt sich allerdings die Frage, inwieweit sich der Umfang der terrestrischen Vermessung auf die Ergebnisse der hydraulischen Berechnung auswirkt, bzw. anders ausgedrückt inwieweit die Vermessung eingeschränkt werden kann, ohne dass dabei die Wasserspiegellagenberechnungen signifikant in ihrer Genauigkeit abnehmen. Darüber hinaus stellt sich die Frage, ob Qualitätseinbußen, die sich möglicherweise durch Reduzierung der terrestrischen Vermessung ergeben, durch ein klassisches Interpolationsverfahren oder durch das in Kapitel 7 beschriebene, neu entwickelte Verfahren, bei dem sowohl vorhandene terrestrische Vermessungsdaten als auch das vorhandene hochaufgelöste Geländemodell optimal ausgenutzt werden, kompensiert werden können.

8.2 Vorgehensweise

Durch eine schrittweise Reduzierung der Abstände vermessener Querprofile soll zunächst aufgezeigt werden, wie sich die jeweils ermittelten Wasserspiegellagen und die überschwemmungsgefährdeten Bereiche gegenüber den ursprünglichen, relativ genauen Ergebnissen verändern.

Die Ergebnisse, die unter Zuhilfenahme sämtlicher vorliegender Vermessungsdaten erstellt wurden, werden als qualitativ hochwertig betrachtet und dienen somit als Referenz für den Vergleich mit anderen Variantenrechenläufen, bei denen die Anzahl der Querprofile reduziert wurde. Die Ergebnisse des Referenzzustands sind identisch mit den Ergebnissen, die in Kapitel 5 „Erstellung von Hochwassergefahrenkarten im TBG 402“ vorgestellt wurden.

Zwei verschiedene Fragestellungen wurden im Rahmen der vorliegenden Studie bearbeitet. Einerseits wurde untersucht, welche Auswirkung eine Verringerung der Anzahl von vermessenen Querprofilen auf die Wasserspiegelhöhe und die Überflutungsfläche hat. Zum anderen wurde nachgeprüft, ob es möglich ist, die verringerte Anzahl von vermessenen Querprofilen durch Zusatzprofile zu kompensieren. Die beiden Aufgabenteile werden jeweils in den Unterkapiteln „Sensitivitätsanalyse mit Zusatzprofilen“ und „Sensitivitätsanalyse ohne Zusatzprofile“ behandelt.

Für den ersten Bearbeitungsteil („Sensitivitätsanalyse mit Zusatzprofilen“) wurden an drei exemplarischen Gewässerabschnitten schrittweise Querprofile aus der hydraulischen Berechnung herausgenommen und somit der Querprofilabstand vergrößert. Jeweils 3 Varianten (Variante A, B, C) mit verschiedenen Querprofilabständen wurden geprüft. Bei Variante A blieb möglichst jedes zweite Profil im Vergleich zum Referenzzustand bestehen, bei Variante B möglichst jedes dritte Profil. Da der Querprofilabstand nach Ausdünnung immer von der Lage der ursprünglichen Profile sowie der Bauwerke abhängt, können diese Kriterien zur Ausdünnung jeweils nur eine grobe Richtlinie darstellen. Vielmehr wurde Wert darauf gelegt, dass sich nach der Ausdünnung stets relativ einheitliche Querprofilabstände ergeben. Variante C besteht nur aus den Profilen der Querbauwerke, sowie aus dem ersten und letzten Profil des gewählten Abschnitts und stellt somit hinsichtlich des Vermessungsumfangs eine Minimalvariante dar.

Vergangene Studien und Untersuchungen [19, 14] haben gezeigt, dass Bauwerke bedingt durch Rückstau bedeutsamen Einfluss auf die Wasserspiegellagen haben. Aus diesem Grund wurde die Einschränkung von Bauwerksvermessungen nicht näher untersucht. Zur Beschreibung eines Bauwerks

werden im hydraulischen Modell i. d. R. mehrere Querprofile benötigt (unbeeinflusste Gewässerprofile im Ober- und Unterwasser des Bauwerks sowie Bauwerksprofile). Diese resultieren oftmals nur aus einem Vermessungsprofil, das im Rahmen des Modellaufbaus entsprechend vervielfacht wird. Alle zur Beschreibung eines Bauwerks erforderlichen Profile blieben in den Ausdünnungsvarianten stets erhalten.

Alle Variantenberechnungen beziehen sich auf ein Hochwasserereignis von HQ_{100} . Veränderungen im Vergleich zum Referenzzustand betreffen stets nur die Querprofilgeometrien bzw. die Querprofilabstände. Rauigkeits- und Verlustbeiwerte sowie umströmte Querschnittsbereiche („blocked obstructions“), die die Bebauung berücksichtigen, wurden beibehalten. Soweit möglich, wurden außerdem auch Uferborde („banks“), nichtdurchströmte Teilbereiche („ineffective flow areas“) und Dämme („levees“) übernommen.

Der zweite Teil der Untersuchung („Sensitivitätsanalyse ohne Zusatzprofile“) hatte das Ziel zu prüfen, ob es möglich ist, die verringerte Anzahl von vermessenen Querprofilen durch Zusatzprofile zu kompensieren. Hierzu wurden die Varianten A, B, C jeweils so mit nachträglich erzeugten Zusatzquerprofilen ergänzt, dass die Profillanzahl und Profillagen mit dem Referenzzustand wieder übereinstimmten. Die Zusatzprofile ergaben sich hierbei zum einen aus einem reinen Interpolationsverfahren, wie es im Softwarepaket HEC-RAS implementiert ist, zum anderen wurde das in Kapitel 1 entwickelte Verfahren zur Querprofillerstellung mit dem XS-Creator angewandt. Mit Hilfe der überarbeiteten Hydraulikmodelle wurden Wasserspiegellagenberechnungen durchgeführt und die Ergebnisse mit dem Referenzzustand bzw. mit den Ergebnissen der jeweiligen Berechnungen ohne Zusatzprofile verglichen.

Die nachträgliche Ergänzung der Querprofile erfolgte für alle drei Ausdünnungsvarianten (Variante A, B und C). Auf diese Weise war es möglich, auch für den Fall mit Zusatzprofilen eine Art Sensitivitätsanalyse durchführen zu können, um damit zu überprüfen, wie gut die beiden getesteten Verfahren zur nachträglichen Erzeugung von Querprofilen bei unterschiedlichem Vermessungsumfang funktionieren.

8.3 Auswahl exemplarischer Gewässerabschnitte

Um eine Übertragbarkeit der Untersuchungsergebnisse auf andere Gewässerabschnitte gewährleisten zu können, wurde die Untersuchung zur Minimierung des Vermessungsaufwands für drei verschiedene Gewässerstrecken durchgeführt. Die Gewässerstrecken wurden so ausgesucht, dass sie in ihren Eigenschaften sehr unterschiedlich sind. Eine Übersicht der Gewässerabschnitte ist in Tab. 8.1 zusammengestellt.

Tab. 8.1 gewählte Gewässerstrecken für Untersuchung zur Minimierung des Vermessungsaufwands

Gewässer	Bezeichnung	Stationierung [km]	Länge [km]	HQ ₁₀₀ [m³/s]	Eigenschaften
Neckar	Neckar uh. Mühlen	68+346 bis 70+259	1,913	562,03	großes Gewässer (Breite ca. 35 m), regelmäßiger Gewässerverlauf, ein Querbauwerk, Abfluss über Vorländer und Gewässerbett bei HQ ₁₀₀
Neckar	Neckar bei Horb	75+509 bis 76+738	1,229	540,25	großes Gewässer (Breite ca. 35 m), regelmäßiger Gewässerverlauf, jedoch Schwankungen in der Sohlhöhe, fünf Querbauwerke, Abfluss über Vorländer und Gewässerbett bei HQ ₁₀₀
Talbach	Talbach	0+035 bis 1+045	1,010	10,18	kleines bis mittleres Gewässer (Breite ca. 2-10 m), unregelmäßiger Gewässerverlauf, vier Querbauwerke, überwiegend Abfluss über Gewässerbett bei HQ ₁₀₀

8.4 Sensitivitätsanalyse für den Neckar unterhalb Mühlen

8.4.1 Charakterisierung des Gewässerabschnitts

Im Abschnitt „Neckar unterhalb Mühlen“ wurde eine 1,9 km lange Fließstrecke des Neckars in einem Außengebiet ohne Bebauung betrachtet. Der Abschnitt ist charakterisiert durch einen sehr regelmäßigen Profilverlauf mit breiten Vorländern (vgl. Abb. 8.1), die bei größeren Hochwassern flächig überflutet werden.



a) Station km 70+259: uh. Mühlen



b) Station km 68+769: uh. Mühlen

Abb. 8.1 Fotografische Aufnahmen des Gewässerabschnitts Neckar uh. Mühlen

8.4.2 Sensitivitätsanalyse ohne Zusatzprofile

Für den ausgewählten Gewässerabschnitt unterhalb Mühlen lagen durch die Vermessung 15 Gewässerprofile und ein Bauwerksprofil vor. Die Lage der Profile ist in Anlage D.1.1 dargestellt. Die Gewässerprofile weisen Abstände von 100 m bis 213 m auf. Der mittlere Abstand beträgt 136 m. Durch das Herausnehmen einzelner Profile in der hydraulischen Berechnung wurden die Abstände für Variante A, B und C schrittweise künstlich vergrößert. Für Variante A bleiben 8 Profile, für Variante B 5 Profile und für Variante C 3 Profile berücksichtigt. Alle Profile im direkten Nahbereich von Bauwerken zählen jeweils als ein Profil. Der mittlere Profilabstand der drei Varianten kann Tab. 8.2 entnommen werden. Welche Profile im Einzelnen in den verschiedenen Varianten berücksichtigt wurden, ist in Anlage D.1.2 dargestellt.

Tab. 8.2 Neckar uh. Mühlen: Querprofilabstände der Variante A, B, C

	Referenzzustand	Variante A	Variante B	Variante C
minimaler Profilabstand [m]	100	160	368	472
maximaler Profilabstand [m]	213	294	527	1440
mittlerer Profilabstand [m]	136	239	452	956

Zunächst wurde untersucht, wie sich eine Erhöhung der Querprofilabstände auf die Wasserstände auswirkt. In Anlage D.1.3 ist ein Vergleich der Wasserspiegellängen für den Referenzzustand und der Varianten A, B, C in Form eines Wasserspiegellängsschnitts zu finden. In Abb. 8.2 sind für alle drei Varianten die Wasserspiegeldifferenzen im Bezug zum Referenzzustand dargestellt.

Es zeigt sich, dass die Wasserspiegel der Variante A und des Referenzzustands sich mit nur 1 cm mittlerer, absoluter Abweichung kaum unterscheiden (vgl. Tab. 8.4, Seite 73). Im Rückstaubereich der Brücke zur Kläranlage sind auch die Wasserspiegel der Varianten B und C ähnlich dem Referenzzustand. Höhere Wasserspiegeldifferenzen treten bei Variante B und C jedoch unterstromig der Brücke auf. So liegen hier Abweichungen von -53 cm bis +27 cm für Variante B, bzw. -32 cm bis +41 cm für Variante C vor. Dies spiegelt sich auch in den mittleren Abweichungen wider. Für Variante B beträgt diese 12 cm und für Variante C 10 cm.

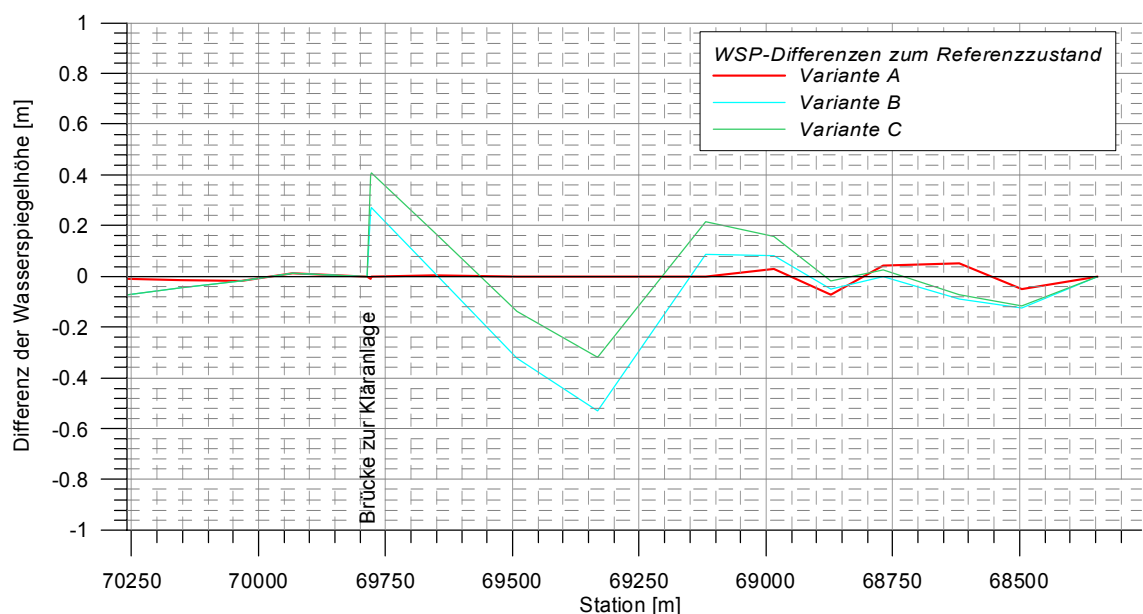


Abb. 8.2 Neckar uh. Mühlen: Längsprofil der Wasserspiegelabweichungen für die Varianten A, B, C (ohne Zusatzprofile)

Die Tatsache, dass Variante A den Referenzzustand sehr gut widerspiegelt, ist auch in der Betrachtung der Flächenausbreitungen zu sehen. Wie aus Abb. 8.3 und

Tab. 8.3 ersichtlich, ist die Flächenausbreitung für Variante A und den Referenzzustand nahezu identisch. So kann 99,89% der Überflutungsfläche aus dem Referenzzustand durch Variante A korrekt bestimmt werden. Auch die Überschwemmungsflächen für Variante B und C kommen trotz der größeren Wasserspiegeldifferenzen dem Referenzzustand sehr nahe. Begründen lässt sich dies damit, dass die Überschwemmungsflächen im Gewässerabschnitt unterhalb Mühlen mehrheitlich durch Dämme begrenzt sind. Solange die Wasserspiegel im Bereich zwischen Dammunter- und Dammoberkante liegen,

haben Schwankungen somit kaum Veränderungen in der Überschwemmungsfläche zur Folge.

**ABBILDUNG BLEIBT
UNVERÖFFENTLICHT!**

Abb. 8.3 Neckar uh. Mühlen: Flächenausbreitung für Variante A, B, C (ohne Zusatzprofile)

Tab. 8.3 Neckar uh. Mühlen: Flächenabweichungen für Variante A, B, C (ohne Zusatzprofile)

Überflutungsfläche im Referenzzustand: 449378 m ²						
Variante	nicht bestimmte Überflutungsfläche* (im Vergleich zum Referenzzustand)		falsch bestimmte Überflutungsfläche* (im Vergleich zum Referenzzustand)		korrekt bestimmte Überflutungsfläche* (im Vergleich zum Referenzzustand)	
	[m ²]	[%]	[m ²]	[%]	[m ²]	[%]
A (ohne Zwischenprofile)	107	0,02	146	0,03	449271	99,98
B (ohne Zwischenprofile)	4415	0,98	1153	0,26	444963	99,02
C (ohne Zwischenprofile)	3231	0,72	2308	0,51	446147	99,28
* vgl. Abb. 8.4						

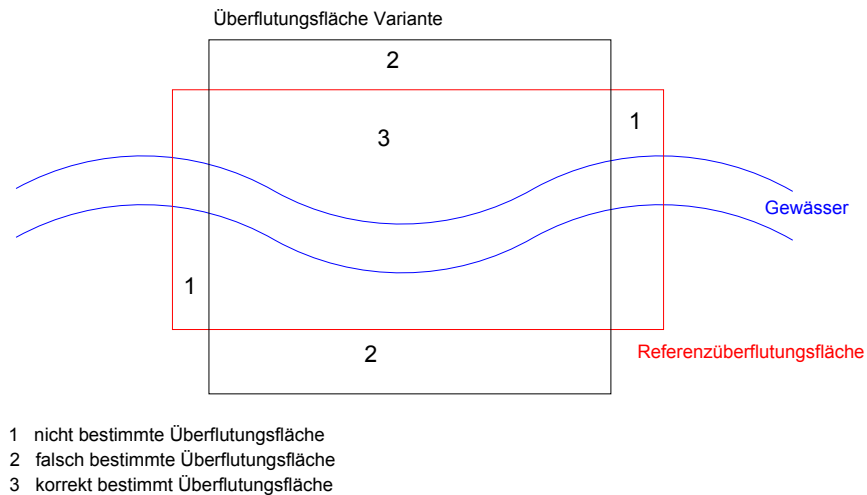


Abb. 8.4 Prinzipskizze zur Veranschaulichung des Überflutungsflächenvergleichs zwischen Referenzzustand und Varianten

8.4.3 Sensitivitätsanalyse mit Zusatzprofilen

Im zweiten Schritt der Untersuchung wurden die Querprofile der Varianten A, B und C durch nachträglich generierte Zusatzprofile so ergänzt, dass Profilanzahl- und -abstände mit dem Referenzzustand wieder übereinstimmen. Die Zusatzprofile wurden zum einen mit Hilfe des Interpolationsverfahrens von HEC-RAS („HEC-RAS Profile“) erzeugt, zum anderen mit dem Programm „XS-Zusatzprofile“ des XS-Creators („XS-Creator Profile“).

Das Ergebnis der Profilerzeugung ist in den Anhängen D.1.4, D.1.5 und D.1.6 in Form von Querprofilen dokumentiert. Für jeden Berechnungsknoten werden hier die mittels XS-Creator generierten Zusatzprofile den Originalprofilen des Referenzzustands gegenübergestellt.

In den Anhängen D.1.7, D.1.8 sowie D.1.9 werden für alle drei Varianten mit ergänzten Zusatzprofilen die berechneten Wasserspiegellagen in Form von Wasserspiegellängsschnitten mit den Ergebnissen des Referenzzustands verglichen. In Abb. 8.5 sind die Wasserspiegelabweichungen vom Referenzzustand in Form von Differenzenlängsschnitten dargestellt

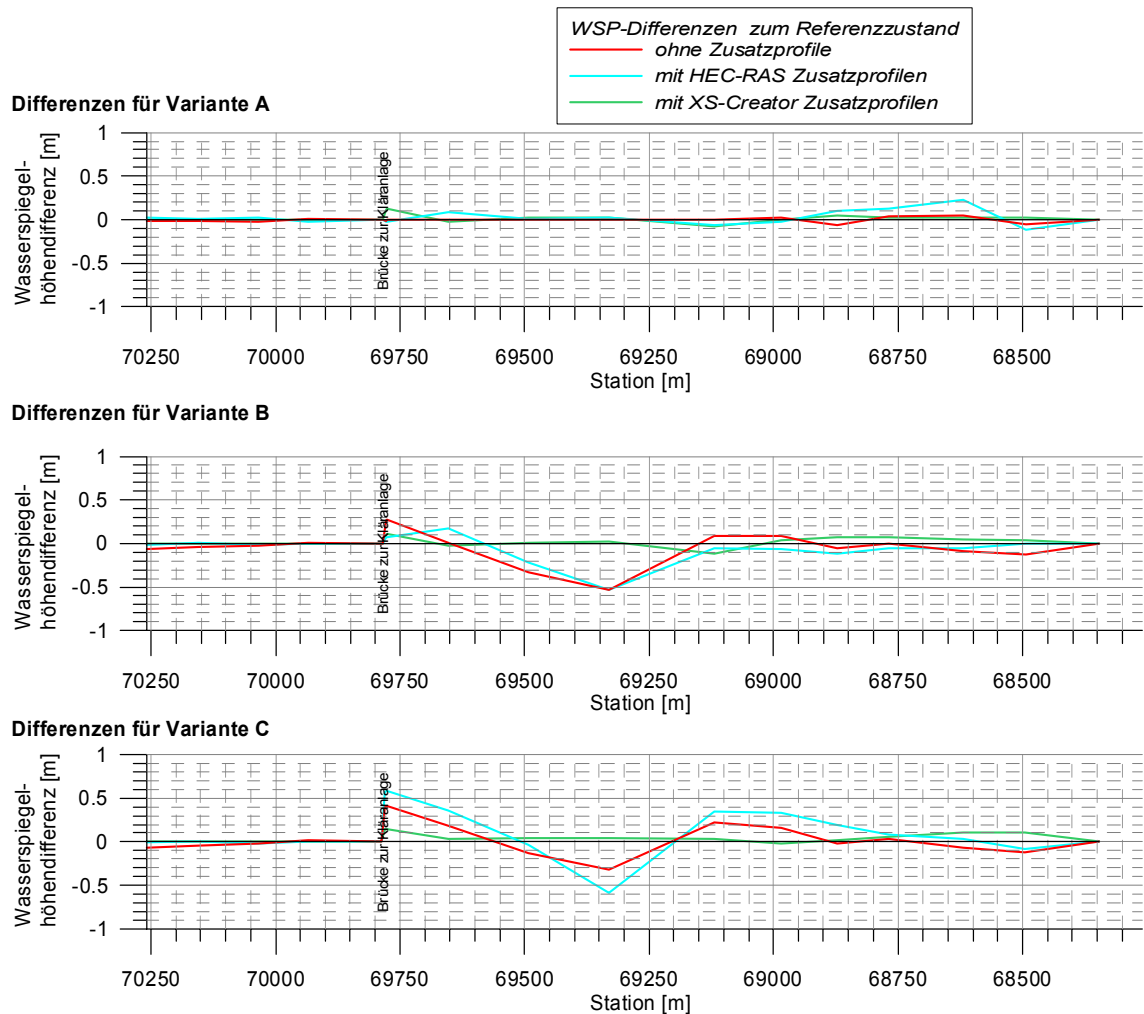


Abb. 8.5 Neckar uh. Mühlen: Längsprofil der Wasserspiegelabweichungen für die Varianten A, B, C (mit Zusatzprofilen)

Die Ergebnisse zeigen, dass das Einfügen von HEC-RAS Profilen für den untersuchten Gewässerabschnitt in Bezug auf die Berechnungsgenauigkeit keine eindeutige Verbesserung erbringt. Wie aus Tab. 8.4 ersichtlich, wird sowohl für Variante A als auch für Variante C durch Hinzunahme von HEC-RAS Profilen die Genauigkeit im Vergleich zu den Varianten ohne Zusatzprofile sogar verschlechtert. Beispielsweise beträgt die mittlere Wasserspiegelabweichung vom Referenzzustand für Variante C ohne Zusatzprofile 10 cm, für Variante C mit HEC-RAS Profilen 17 cm.

Tab. 8.4 Neckar uh. Mühlen: Wasserspiegelabweichungen vom Referenzzustand für Variante A, B, C (mit und ohne Zusatzprofile)

Variante	Beschreibung	minimale Abweichung [m]	maximale Abweichung [m]	mittlere, absolute Abweichung [m]
A	ohne Zwischenprofile	-0,07	0,05	0,01
	Zwischenprofile durch HEC-RAS	-0,11	0,23	0,05
	Zwischenprofile durch XS-Creator	-0,08	0,12	0,02
B	ohne Zwischenprofile	-0,53	0,27	0,12
	Zwischenprofile durch HEC-RAS	-0,53	0,18	0,11
	Zwischenprofile durch XS-Creator	-0,11	0,11	0,03
C	ohne Zwischenprofile	-0,32	0,41	0,10
	Zwischenprofile durch HEC-RAS	-0,58	0,58	0,17
	Zwischenprofile mit XS-Creator	-0,02	0,14	0,04

Die Ergebnisse zeigen aber auch, dass für den untersuchten Gewässerabschnitt die Genauigkeit durch Zusatzprofile, die mit Hilfe des neuen Interpolationsverfahrens generiert wurden (XS-Creator Profile), deutlich erhöht werden kann. Für Variante B ohne Zwischenprofile wurde eine mittlere Wasserspiegelabweichung von 12 cm ermittelt. Diese kann durch die Ergänzung von XS-Creator Profilen auf nur noch 3 cm reduziert werden (vgl. Tab. 8.4). Für Variante C kann die mittlere Abweichung von 10 cm auf 4 cm um 6 cm verringert werden.

8.5 Sensitivitätsanalyse für den Neckar bei Horb

8.5.1 Charakterisierung des Gewässerabschnitts

Der untersuchte Gewässerabschnitt bezieht sich auf eine 1,2 km lange Fließstrecke des Neckars durch das Stadtgebiet Horb, also innerhalb von bebautem Gebiet. Bei einem Hochwasserereignis von HQ_{100} werden die Vorländer teilweise überflutet. Wie Abb. 8.6 zeigt, ist die Breite des Gewässers regelmäßig und auch Krümmungen sind kaum vorhanden. Allerdings weist die Gewässersohle zahlreiche Verkolkungen und Verlandungen auf, die auf drei vorhandene Brückenbauwerke und zwei Wehre zurückzuführen sind.



a) Station km 76+629: Ortslage Horb



b) Station km 75+998: Ortslage Horb

Abb. 8.6 Fotografische Aufnahmen des Gewässerabschnitts Neckar bei Horb

8.5.2 Sensitivitätsanalyse ohne Zusatzprofile

Für den Gewässerabschnitt Neckar bei Horb wurden vom Vermesser 30 Gewässerprofile mit einem mittleren Abstand von 47 m aufgenommen. Zudem wurden drei Brücken und zwei Wehre vermessen. Die Lage aller Profile kann Anlage D.2.1 entnommen werden. Für die Variante A werden 17 Gewässerprofile, für Variante B 12 und für Variante C 10 Gewässerprofile berücksichtigt. Die Brücken und Wehre einschließlich zugehöriger Gewässerprofile sind stets enthalten. Alle Profile im direkten Nahbereich von Bauwerken zählen jeweils als ein Profil. Die im Einzelnen berücksichtigten Profile jeder Variante sind in Anlage D.2.2 aufgelistet. Die Tab. 8.5 stellt minimale, mittlere und maximale Querprofilabstände der Varianten dar.

Tab. 8.5 Neckar bei Horb: Querprofilabstände der Variante A, B, C

	Referenzzustand	Variante A	Variante B	Variante C
minimaler Profilabstand [m]	22	45	45	45
maximaler Profilabstand [m]	137	137	247	384
mittlerer Profilabstand [m]	47	95	158	197

Die für die einzelnen Varianten berechneten Wasserspiegelhöhen sind als Wasserspiegellängsschnitt in Anlage D.2.3 dargestellt. Abb. 8.7 zeigt die Abweichungen der Wasserspiegelhöhen vom Referenzzustand in Form eines Differenzenlängsschnitts.

Aus den Ergebnissen geht hervor, dass Variante A relativ gut mit dem Referenzzustand übereinstimmt. Die Abweichungen liegen in der Regel zwischen ± 8 cm. Ausnahme hiervon bildet der Bereich zwischen Kulturwehr und Christopherusbrücke, wo Abweichungen von bis zu -24 cm vorhanden sind. Die Ursache hierfür ist eine Sohleintiefung von ca. 1 m zwischen den Bauwerken. Durch die Ausdünnung der Profile wurden sowohl in Variante A als auch in den Varianten B und C die relevanten Vermessungsquerprofile, die die Sohleintiefung wiedergeben, entfernt. Dies führt zwangsläufig zu Fehlern in der Berechnung. Der untersuchte Gewässerabschnitt ist geprägt durch unregelmäßige Sohlthiefen, wie auch im Wasserspiegellängsschnitt zu sehen ist. Je größer die Querprofilabstände gewählt werden, desto weniger werden diese in den Berechnungen berücksichtigt. Hierdurch ergeben sich insbesondere bei starker Ausdünnung der Profile größere Fehler bei der Wasserspiegelagermittlung.

Generell hohe Wasserspiegelabweichungen liegen für Variante B und C vor. So treten bei Variante B oberstromig des Klappenwehrs Abweichungen von bis zu 54 cm und bei Variante C von bis zu 71 cm auf (vgl. Tab. 8.7, Seite 80). Sie begründen sich darin, dass am Wehr ein Wechselsprung vom strömenden in den schießenden Abfluss stattfindet. Durch die verringerte Profilanzahl kann dieser nicht ausreichend wiedergegeben werden.

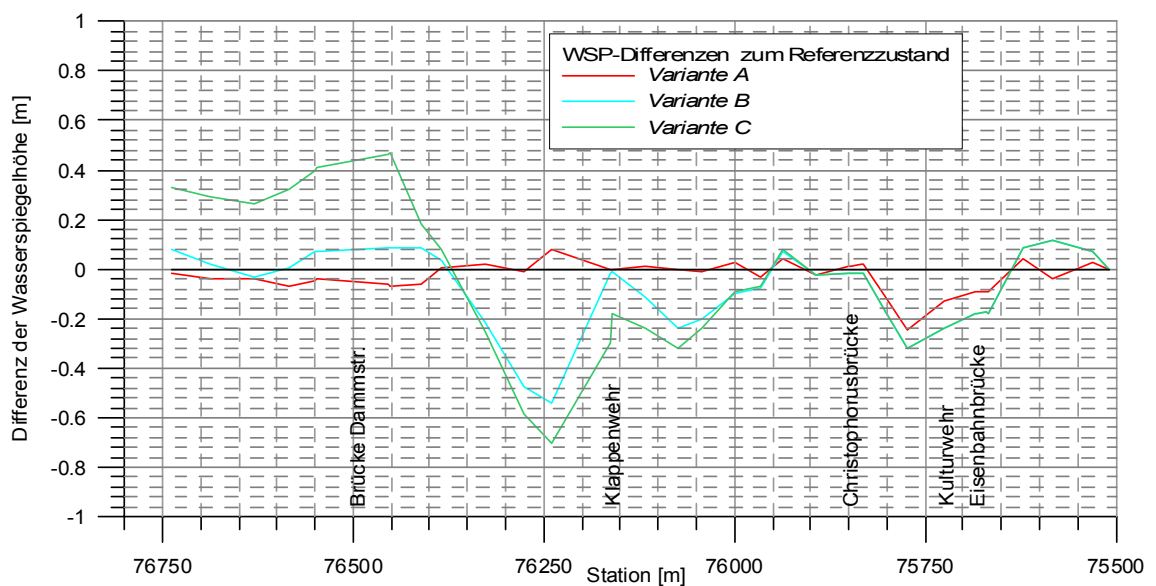


Abb. 8.7 Neckar bei Horb: Längsprofil der Wasserspiegelabweichungen für die Varianten A, B, C (ohne Zusatzprofile)

In Tab. 8.6 sind die Abweichungen der Überschwemmungsflächen vom Referenzzustand aufgeführt. Abb. 8.8 zeigt die Lage der Überschwemmungsflächen. Es zeigt sich, dass mit zunehmendem Querprofilabstand die Genauigkeit abnimmt. So stimmt die Überschwemmungsfläche der Variante A in ihrer Lage und Größe recht gut mit der Referenzfläche überein. Lediglich im Bereich des Kulturwehrs wird für Variante A eine zu kleine Überschwemmungsfläche ermittelt. Für Variante B ergibt sich zwischen Klappenwehr und Brücke Dammstraße eine zu kleine Überflutungsfläche und oberstrom der Brücke Dammstraße eine zu große. Dies betrifft ebenso Variante C. Augenfällig ist hier vor allem der Bereich oberstromig der Brücke Dammstraße, wo die Überschwemmungsfläche die Referenzüberflutungsfläche weitaus überschreitet.

Tab. 8.6 Neckar bei Horb: Flächenabweichungen für Variante A, B, C (ohne Zusatzprofile)

Überflutungsfläche im Referenzzustand: 217046 m²						
Variante	nicht bestimmte Überflutungsfläche* (im Vergleich zum Referenzzustand)		falsch bestimmte Überflutungsfläche* (im Vergleich zum Referenzzustand)		korrekt bestimmte Überflutungsfläche* (im Vergleich zum Referenzzustand)	
	[m²]	[%]	[m²]	[%]	[m²]	[%]
A (ohne Zwischenprofile)	6159	2,84	424	0,20	210887	97,16
B (ohne Zwischenprofile)	11555	5,32	7619	3,51	205491	94,68
C (ohne Zwischenprofile)	15285	7,04	29176	13,44	201761	92,96

* vgl. Abb. 8.4, Seite 71

**ABBILDUNG BLEIBT
UNVERÖFFENTLICHT!**

Abb. 8.8 Neckar bei Horb: Flächenausbreitung für Variante A, B, C (ohne Zusatzprofile)

8.5.3 Sensitivitätsanalyse mit Zusatzprofilen

Den Profilen der Variante A, B und C wurden HEC-RAS und XS-Creator Profile hinzugefügt, so dass die Profilanzahl und die Profilabstände wieder dem Referenzzustand entsprechen. Das Ergebnis der Profilerzeugung mit dem XS-Creator entsprechend Kapitel 7 ist in den Anhängen D.2.4, D.2.5, D.2.6 für die Varianten A, B und C im Vergleich zum Referenzzustand zeichnerisch dargestellt.

Die Ergebnisse der hydraulischen Berechnungen sind in Form von Wasserspiegellängsschnitten in Anlage D.2.7, D.2.8 und D.2.9 für alle drei Varianten einzusehen. Die Abb. 8.9 stellt die Abweichungen der Wasserspiegeln Höhen vom Referenzzustand dar.

Es zeigt sich, dass für den untersuchten Gewässerabschnitt die Genauigkeiten der Wasserspiegelberechnungen bei den Varianten B und C durch das Einfügen von HEC-RAS Profilen leicht erhöht werden konnte. So beträgt beispielsweise die mittlere Abweichung für Variante B vor dem Einfügen der Zusatzprofile 13 cm (vgl. Tab. 8.7). Durch Einfügen von HEC-RAS Profilen wird die mittlere Abweichung auf 10 cm verringert. Die Genauigkeit der Variante A kann durch das Einfügen von HEC-RAS Profilen nicht verbessert werden. Hier bleibt eine mittlere Abweichung von 4 cm auch nach Ergänzung der Zusatzprofile bestehen.

Auch das Einfügen von XS-Creator Profilen bringt eine Genauigkeitssteigerung für Variante B und C. Diese fällt im Vergleich zudem deutlich höher aus als die der HEC-RAS Profilergänzung. Nach Tab. 8.7 besitzt Variante C ohne Zwischenprofile eine mittlere Abweichung von 24 cm. Mit HEC-RAS Profilen beträgt diese 16 cm. Im Vergleich hierzu weist Variante C mit XS-Creator Profilen eine mittlere Abweichung von 11 cm auf. Bei Variante B kann durch XS-Creator Profile die mittlere Abweichung von 13 cm auf 8 cm reduziert werden.

Für alle drei Varianten liegen relativ große Wasserspiegelabweichungen zwischen Station km 76+160 (Kulturwehr) und Station km 76+250 vor. Berech-

nungen, die hier nicht weiter ausgeführt sind, zeigen, dass diese Abweichungen erheblich geringer ausfallen, wenn die vor dem Klappenwehr vorhandene Sohlvertiefung von ca. 1 m in dem hydraulischen Modellaufbau berücksichtigt wird. Sowohl im HEC-RAS Interpolationsverfahren, als auch mit dem Programm „XS-Zusatzprofile“ wird der Flussschlauch aus den Höhenwerten des oberstromigen und des unterstromigen Profils interpoliert. Befindet sich zwischen diesen Profilen eine Sohleintiefung, so wird diese durch eine Interpolation nicht widerspiegelt.

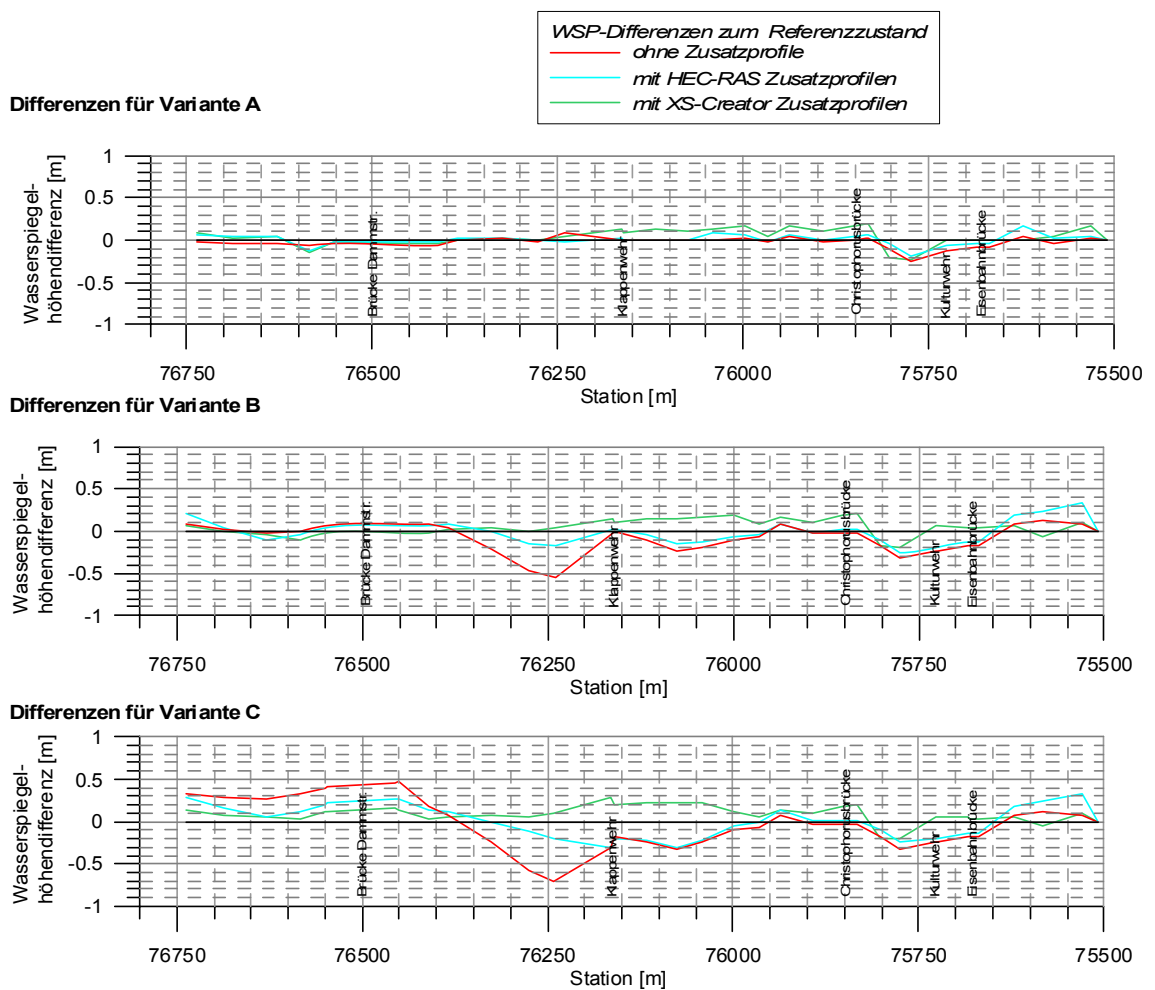


Abb. 8.9 Neckar bei Horb: Längsprofil der Wasserspiegelabweichungen für die Varianten A, B, C (mit Zusatzprofilen)

Tab. 8.7 Neckar bei Horb: Wasserspiegelabweichungen vom Referenzzustand für Variante A, B, C (mit und ohne Zusatzprofile)

Variante	Beschreibung	minimale Abweichung [m]	maximale Abweichung [m]	mittlere, absolute Abweichung [m]
A	ohne Zwischenprofile	-0,24	0,08	0,04
	Zwischenprofile durch HEC-RAS	-0,18	0,18	0,04
	Zwischenprofile durch XS-Creator	-0,24	0,19	0,07
B	ohne Zwischenprofile	-0,54	0,12	0,13
	Zwischenprofile durch HEC-RAS	-0,25	0,34	0,10
	Zwischenprofile durch XS-Creator	-0,20	0,21	0,08
C	ohne Zwischenprofile	-0,71	0,47	0,24
	Zwischenprofile durch HEC-RAS	-0,30	0,34	0,16
	Zwischenprofile mit XS-Creator	-0,20	0,29	0,11

8.6 Sensitivitätsanalyse für den Talbach

8.6.1 Charakterisierung des Gewässerabschnitts

Die 1,0 km lange Fließstrecke des Talbachs zählt zu den kleineren bis mittleren Gewässern. Das Gewässer verläuft sowohl im bebauten, als auch im unbebauten Gebiet. Die Profile sind sehr heterogen und variieren von 2 m bis zu 10 m Gewässerbite (vgl. Abb. 8.10). Bei einem Hochwasserereignis von HQ_{100} sind die Vorländer kaum überflutet, so dass der überwiegende Abfluss über das Gewässerbett verläuft. Der Gewässerabschnitt Talbach ist ausführlich in Kapitel 6.4.1 beschrieben.



a) Station km 0+569: oh. Ortslage Mühlen

b) Station km 0+144: Ortslage Mühlen

Abb. 8.10 Fotografische Aufnahmen des Gewässerabschnitts Neckar bei Horb

8.6.2 Sensitivitätsanalyse ohne Zusatzprofile

Für den Gewässerabschnitt Talbach liegen 36 Gewässerprofile aus der Vermessung mit einem mittleren Profilabstand von 33 m vor. Zudem wurden drei Brücken und ein Absturz vermessen. Die Lage der Profile für den Referenzzustand ist in Anlage D.3.1 dargestellt. Für Variante A wurden 22 Profile, für Variante B 15 und für Variante C 10 Gewässerprofile übernommen. Alle Profile im direkten Nahbereich von Bauwerken zählen jeweils als ein Profil. Welche Profile bei den drei Ausdünnungsvarianten jeweils im Einzelnen berücksichtigt wurden, ist in Anlage D.3.2 nachzulesen. Tab. 8.8 zeigt die minimalen, die maximalen und die mittleren Profilabstände des Referenzzustands und der drei Varianten.

Tab. 8.8 Talbach: Querprofilabstände der Variante A, B, C

	Referenzzustand	Variante A	Variante B	Variante C
minimaler Profilabstand [m]	12	13	13	13
maximaler Profilabstand [m]	103	103	202	524
mittlerer Profilabstand [m]	33	58	101	202

Der Anlage D.3.3 stellt die errechneten Wasserspiegellagen für alle drei Varianten in Form eines Wasserspiegellängsschnitts dar. Die Wasserspiegeldifferenzen zwischen den Ergebnissen der Variantenberechnungen und den Ergebnissen des Referenzzustands zeigt Abb. 8.11.

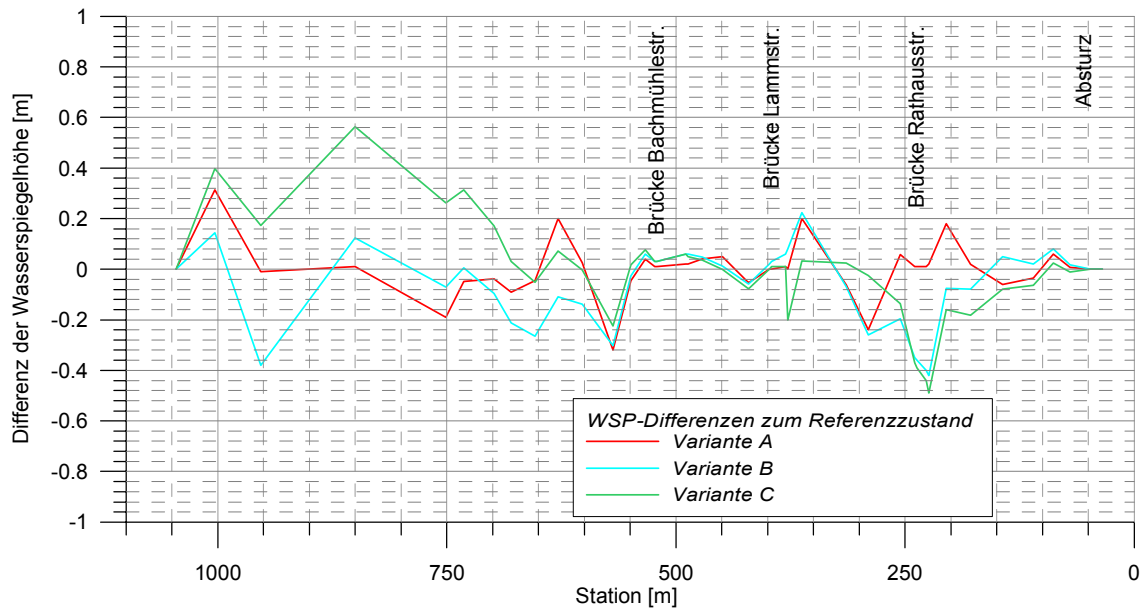


Abb. 8.11 Talbach: Längsprofil der Wasserspiegelabweichungen für die Varianten A, B, C (ohne Zusatzprofile)

Mit keiner der drei Varianten wurden Wasserspiegelverläufe ermittelt, die den Referenzzustand ausreichend genau widerspiegeln. Für Variante A beträgt die mittlere, absolute Abweichung zwar nur 7 cm, örtlich gibt es aber Abweichungen von ± 30 cm. Für Variante B und C fallen diese Abweichungen noch deutlich höher aus (vgl. Tab. 8.10, Seite 86). So liegen z. B. im Oberlauf des betrachteten Gewässerabschnitts die errechneten Wasserspiegel für Variante C um bis zu 56 cm höher als der Referenzwasserspiegel.

Wie Abb. 8.12 zeigt, ist die Flächenausbreitung für Variante A trotz der relativ großen Wasserspiegelabweichungen nahezu identisch mit der Flächenausbreitung des Referenzzustands. So wird 97,5% der Überschwemmungsfläche des Referenzzustandes korrekt bestimmt (vgl. Tab. 8.9). Grobe Fehler werden jedoch für Variante B und C gemacht. In beiden Varianten wird aufgrund zu niedriger Berechnungswasserstände der Einstau der Brücke Rathausstraße, der zu einem deutlichen Anstieg der Wasserspiegellagen im Bereich der Brücke führt, nicht simuliert. Dies hat zur Folge, dass die Überschwemmungsflächen oberhalb der Rathausbrücke nicht die Überflutung in der Rathausstraße einschließen. Oberhalb der Ortslage fällt zudem für Variante C durch den zu hoch berechneten Wasserstand die Überflutungsfläche weitaus größer aus als es im Referenzzustand der Fall ist.

**ABBILDUNG BLEIBT
UNVERÖFFENTLICHT!**

Abb. 8.12 Talbach: Flächenausbreitung für Variante A, B, C (ohne Zusatzprofile)

8.6.3 Sensitivitätsanalyse mit Zusatzprofilen

Für die Varianten A, B und C wurden sowohl HEC-RAS als auch XS-Creator Zusatzprofile erzeugt. Die Lage und die Anzahl der Zusatzprofile ergaben sich aus den ursprüngliche Profilen des Referenzzustands. Das Ergebnis der Profilerzeugung ist in den Anhängen D.3.4, D.3.5 und D.3.6 in Form von Querprofilen dokumentiert. Grafisch werden hier die mittels XS-Creator generierten Zusatzprofile den Originalprofilen des Referenzzustands gegenübergestellt. In den Anhängen D.3.7, D.3.8 und D.3.9 liegt für jede Variante ein Vergleich von Wasserspiegelhöhen ohne Zusatzprofile und Wasserspiegelhöhen mit HEC-RAS bzw. XS-Creator Profilen in Form eines Längsschnitts vor.

Wie in Abb. 8.13 zu sehen ist, führt das Einfügen von HEC-RAS Profilen im Talbach nicht zwangsläufig dazu, dass die Wasserspiegellagen an Genauigkeit zunehmen. Zwar verringert sich die mittlere, absolute Wasserspiegelabweichung für Variante B von 12 cm auf 9 cm (vgl. Tab. 8.10). Für Variante C hingegen vergrößert sich die mittlere Abweichung von 23 cm auf 26 cm. Für Variante A bringt das Einfügen von HEC-RAS Zusatzprofilen nur eine geringfügige Verbesserung. Die Genauigkeit erhöht sich von 7 cm auf 6 cm.

Eine Erhöhung der Genauigkeit kann jedoch für alle drei Varianten durch das Einfügen von XS-Creator Zusatzprofilen erreicht werden. Für die Varianten B und C können hier mittlere, absolute Abweichungen von 7 cm erzielt werden. Die Abweichung für Variante A ist mit 6 cm ähnlich der Abweichung durch die Ergänzung mit HEC-RAS Profilen. Im Gegensatz zu den Berechnungen ohne Zusatzprofile bzw. mit HEC-RAS Profilen spiegelt die Variante B mit XS-Creator Zusatzprofilen auch den Rückstau oberhalb der Brücke Rathausstraße wider. Wie im vorherigen Abschnitt gezeigt wurde, ist dies wichtig, um die Überflutungsfläche der Rathausstraße korrekt zu erfassen. Das neue Interpolationsverfahren führt außerdem auch zu besseren Ergebnissen bei Variante C. Hier wurden ohne Zusatzprofile zu große Überflutungsflächen im Oberlauf des untersuchten Gewässerabschnitts nachgewiesen. Mit Hilfe der XS-Creator Profilergänzungen liegen die Wasserspiegelabweichungen bei Variante C in diesem Bereich durchgängig unter $\pm 0,20$ cm. Die zugehörige Überflutungsfläche könnte folglich mit dem neuen Verfahren vergleichsweise genau bestimmt werden.

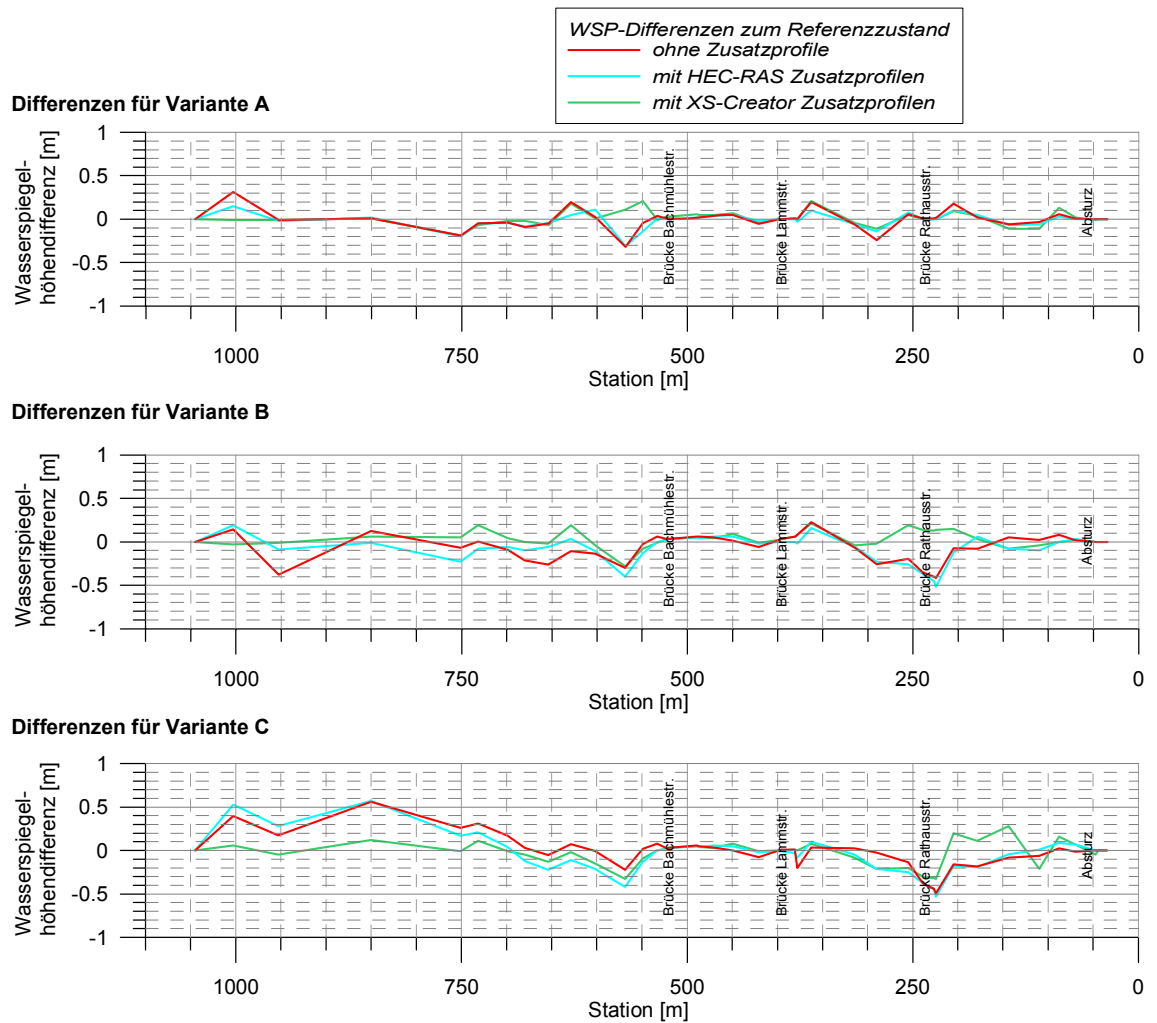


Abb. 8.13 Talbach: Längsprofil der Wasserspiegelabweichungen für die Varianten A, B, C (mit Zusatzprofilen)

Tab. 8.10 Talbach: Wasserspiegelabweichungen vom Referenzzustand für Variante A, B, C (mit und ohne Zusatzprofile)

Variante	Beschreibung	minimale Abweichung [m]	maximale Abweichung [m]	mittlere, absolute Abweichung [m]
A	ohne Zwischenprofile	-0,32	0,31	0,07
	Zwischenprofile durch HEC-RAS	-0,31	0,15	0,06
	Zwischenprofile durch XS-Creator	-0,19	0,21	0,06
B	ohne Zwischenprofile	-0,38	0,14	0,12
	Zwischenprofile durch HEC-RAS	-0,40	0,19	0,09
	Zwischenprofile durch XS-Creator	-0,28	0,19	0,07
C	ohne Zwischenprofile	-0,22	0,56	0,23
	Zwischenprofile durch HEC-RAS	-0,42	0,57	0,26
	Zwischenprofile mit XS-Creator	-0,33	0,12	0,07

8.7 Zusammenfassung der Ergebnisse und Schlussfolgerungen

Entsprechend der Sensitivitätsuntersuchung können am Neckar an beiden Untersuchungsstrecken zumindest bei Variante A (Profilausdünnungsrate ca. 50 %) auch ohne nachträglich ergänzte Zusatzprofile noch qualitativ hochwertige Ergebnisse hinsichtlich der berechneten Wasserspiegellagen erzielt werden. Am Talbach hingegen treten bei der gleichen Variante bereits größere Berechnungsungenauigkeiten auf. Dies lässt darauf schließen, dass es grundsätzlich unkritischer ist, den Vermessungsumfang an großen, gleichmäßig fließenden Flüssen zu reduzieren, als Querprofile an kleinen, unregelmäßig gearteten Flüssen einzusparen.

Es gibt allerdings auch an den größeren Flüssen Grenzen, ab denen eine zuverlässige Berechnung der Wasserspiegellagen nicht mehr gewährleistet werden kann. Dies zeigte sich am Neckar bei der Betrachtung der Varianten B und C, bei denen Profilausdünnungsraten von deutlich über 50 % untersucht wurden.

Hinsichtlich der berechneten Überflutungsflächen lässt sich feststellen, dass fehlerhafte Wasserspiegellagenberechnungen nicht zwangsläufig auch zu größeren Fehlern bei der Überflutungsermittlung führen müssen. Dies trifft insbesondere dann zu, wenn das Gewässer wie am Talbach noch nicht ausbordet oder, wie es am Neckar unterhalb Mühlen beobachtet wurde, Dammstrukturen im Bereich der Vorländer die Überflutung begrenzen. Tritt allerdings ein Schaltereffekt ein (z. B. Überflutung eines Damms), dann können prinzipiell auch kleine Wasserspiegeländerungen bereits zu großen Veränderungen in den Überflutungsflächen führen.

Durch nachträglich ergänzte Querprofile können Wasserspiegelberechnungen, die auf einer lückenhaften Vermessung beruhen zumeist qualitativ verbessert werden. In den untersuchten Gewässerabschnitten hat sich gezeigt, dass hier insbesondere das neue Interpolationsverfahren, das nur im Bereich des Gewässerbett-Höhen zwischeninterpoliert und in den Vorlandbereichen die Höhenin-

formationen des hochaufgelösten digitalen Geländemodells nutzt, klare Vorteile aufweist, da es in nahezu allen Fällen zu besseren Endergebnissen führte.

Auffällig war, dass das neue Interpolationsverfahren insbesondere dann zu einer markanten Verbesserung der Ergebnisse führte, wenn nur sehr wenige Vermessungsinformationen zur Verfügung standen. Bei Variante C konnte durch das neue Verfahren in allen drei Untersuchungsbereichen sowohl die mittlere, als auch die maximale Abweichung markant reduziert werden. Dies bedeutet, dass das neue Interpolationsverfahren insbesondere dazu geeignet ist, in Außengebieten ohne Bebauung, wo die Anforderungen an die Genauigkeit nicht so groß sind und Ergebnisse auch nicht so belastbar sein müssen, mit minimalem Vermessungsaufwand plausible Wasserspiegellagen abzuschätzen.

Die Ergebnisse zeigen auch, dass Zusatzprofile zwar die Genauigkeit steigern können, aber oftmals keinen ausreichenden Ersatz für die terrestrische Vermessung darstellen. Profile, die erhebliche Veränderungen im Gewässerverlauf repräsentieren (z. B. Sohlschwankungen, Veränderungen in der Geometrie etc.) haben großen Einfluss auf die Wasserstände. Sie können weder durch HEC-RAS Profile, noch durch XS-Creator Profile ohne zu große Genauigkeitsverluste ersetzt werden. An solchen Stellen ist eine terrestrische Vermessung unabdingbar. In Bereichen, in denen hohe Anforderungen an die Genauigkeit der berechneten Wasserspiegellagen gelegt werden (bebaute Gewässerabschnitte) sollte deshalb nach wie vor nicht auf terrestrische Vermessung verzichtet werden.

Durch nachträglich ergänzte Querprofile können Wasserspiegelberechnungen, die auf einer lückenhaften Vermessung beruhen, zumeist qualitativ verbessert werden. Die Zusatzprofile sollten jedoch nicht vollständig interpoliert werden, wie es beispielsweise durch HEC-RAS geschieht. Weitaus bessere Ergebnisse sind erreichbar, wenn, wie bei der neuen Profilerzeugungsmethodik, nur der Flussschlauch interpoliert wird und die Höhendaten der Vorländer und gegebenenfalls der Ufer aus einem DGM gewonnen werden (vgl. Kapitel 1).

9 Zusammenfassung

In Baden-Württemberg werden derzeit für ca. 12.500 km Gewässer Hochwassergefahrenkarten erstellt. Hierfür sind umfangreiche hydraulische Berechnungen erforderlich, die es zu optimieren gilt. Bei der Wasserspiegelagermittlung kommen zumeist eindimensionale Berechnungsverfahren zum Einsatz bei denen die Topografie der Gewässer und Vorländer über Querprofile erfasst werden. Im Rahmen der Hochwassergefahrenkartenerstellung werden diese Querprofile zum einen im Bereich des Gewässers über kostenintensive, terrestrische Vermessung und zum anderen im Bereich der Vorländer über ein digitales Geländemodell (DGM) bestimmt.

In der vorliegenden Arbeit wurde ein Verfahren entwickelt, mit dessen Hilfe die Querprofilerstellung und damit insgesamt die Methodik zur Erstellung der Hochwassergefahrenkarten verbessert werden kann. Das Verfahren ermöglicht es, unter optimaler Ausnutzung sowohl der vorhandenen terrestrischen Vermessungsdaten, als auch des hochaufgelösten digitalen Geländemodells zusätzlich zur vorhandenen Vermessung an beliebigen Stellen Ergänzungsquerprofile zu generieren. Das Verfahren kann prinzipiell dazu genutzt werden, den terrestrischen Vermessungsaufwand zu minimieren, um dadurch Kosten einzusparen. Andererseits ist es hiermit auch möglich, zusätzliche Profilinformationen in die Berechnungsmodelle einfließen zu lassen, um somit die Qualität der Ergebnisse grundsätzlich zu verbessern. Das neue Verfahren zur Erzeugung zusätzlicher Querprofile wurde im Rahmen einer Sensitivitätsuntersuchung an drei exemplarischen Gewässerabschnitten getestet und einem klassischen Interpolationsverfahren gegenübergestellt. Die Sensitivitätsuntersuchung ermöglichte es außerdem aufzuzeigen, inwiefern sich der Umfang der terrestrischen Vermessung auf die Qualität der Berechnungsergebnisse auswirkt.

Im ersten Schritt der Untersuchung wurde für einen 13,5 km langen Teilabschnitt des Neckars im Bereich der Stadt Horb am Neckar sowie für die seitlichen Zuflüsse Diessenerbach (7,1 km) und Talbach (1,0 km) Hochwassergefahrenkarten erstellt. Hierfür wurden für alle drei Gewässer unter Zuhilfe-

nahme des Softwarepakets HEC-RAS eindimensionale, hydronumerische Modelle aufgebaut, mit denen Wasserspiegellagenberechnungen durchgeführt wurden. Die Erzeugung der erforderlichen Berechnungsquerprofile erfolgte mit Hilfe des geographischen Informationssystems ArcView GIS und der Zusatzsoftware „XS-Creator“, einem firmeninternen Produkt des Ingenieurbüros WALD + CORBE, Hügelsheim. Die potentiellen Überflutungsflächen konnten durch Verschneidung der berechneten Wasserspiegellagen mit dem digitalen Geländemodell gewonnen werden. Die erzeugten Querprofile und Überflutungsflächen dienten als Basis für alle weitergehenden Untersuchungen.

Der zweite Bearbeitungsteil konzentriert sich auf die Entwicklung des neuen Verfahrens zur nachträglichen Ergänzung von Berechnungsquerprofilen auf Grundlage der vorhandenen terrestrischen Vermessung und des flächendeckend verfügbaren hochaufgelösten digitalen Geländemodells. Da das DGM im Bereich der Vorländer und Ufer prinzipiell eine sehr gute Qualität aufweist, während Geländehöhen unterhalb des Wasserspiegels nicht bzw. nur unzureichend durch das DGM wiedergegeben werden, sieht das hier entwickelte Verfahren zur Profilerzeugung vor, Geländehöhen so weit als möglich aus dem DGM abzuleiten. Nur die Gewässergeometrie unterhalb des Wasserspiegels (zzgl. Sicherheitspuffer) wird aus dem nächst oberstromigen und unterstromigen Profil mit bekannten Vermessungsdaten mittels eines Lamellenverfahrens interpoliert. Somit werden alle verfügbaren Geländehöheninformationen optimal ausgenutzt. Die Umsetzung der Methodik erfolgte speziell für den Arbeitsablauf des Ingenieurbüros WALD + CORBE in Hügelsheim. Dazu wurde die bereits bestehende Software „XS-Creator“ zur Herstellung von Querprofilen mit dem Avenueprogramm „XS-Zusatzprofile“ erweitert. Prinzipiell kann die Methodik jedoch auch in einer anderen Software implementiert werden.

Mittels einer Sensitivitätsanalyse wurden die Auswirkungen verringerter Vermessung auf die Wasserspiegel und Überflutungsflächen aufgezeigt. Hierzu wurden die Abstände vermessener Querprofile an drei Gewässerabschnitten schrittweise reduziert. Jeweils 3 Varianten (Variante A, B, C) mit verschiedenen Querprofilabständen wurden geprüft. Die Ergebnissen wurden mit den

ursprünglichen Ergebnissen (Referenzzustand), ohne eine Reduzierung der Vermessung, verglichen.

Im Rahmen der Sensitivitätsanalyse wurde ferner untersucht, ob es möglich ist, eine verringerte Anzahl von vermessenen Querprofilen durch Zusatzprofile zu kompensieren. Die Varianten wurden hierzu so mit nachträglich erzeugten Zusatzquerprofilen ergänzt, dass die Profilanzahl und Profillagen mit dem Referenzzustand wieder übereinstimmten. Die Zusatzprofile wurden zum einen mit einem klassischen Interpolationsverfahren aus HEC-RAS, zum anderen mit der hier entwickelten Methodik der Profilerstellung erzeugt.

Die Sensitivitätsuntersuchung zeigte, dass durch nachträglich ergänzte Querprofile Wasserspiegellagenberechnungen, die auf einer lückenhaften Vermessung beruhen, zumeist qualitativ verbessert werden können. Insbesondere das hier entwickelte, neue Interpolationsverfahren weist klare Vorteile auf, da es in nahezu allen Fällen zu besseren Endergebnissen führte.

Außerdem stellte sich heraus, dass gerade für kleinere, unregelmäßige Gewässer ein erhöhter Profilbedarf zwingend notwendig ist, um Wasserspiegellagen mit ausreichender Genauigkeit zu bestimmen. Für Innenbereiche mit hohem Genauigkeitsanspruch sollten diese Profile aus Vermessungsdaten generiert werden. Für größere Gewässer mit gleichmäßigen Geometrien könnte jedoch, besonders in Außengebieten mit vermindertem Genauigkeitsanspruch, die Vermessung eingeschränkt werden, wenn stattdessen ausreichend Zusatzprofile mit dem hier vorgestellten Verfahren erzeugt werden.

In dieser Arbeit wird somit ein Weg aufgezeigt, mit dem sich die Kosten der terrestrischen Vermessung in Teilbereichen reduzieren lassen. Zudem wurde ein Werkzeug geschaffen, das die Qualität von eindimensionalen Wasserspiegellagenberechnungen, insbesondere bei Vorliegen von nur lückenhafter Vermessung, erheblich verbessern kann.

Literaturverzeichnis

- [1] **Bund der Ingenieure für Wasserwirtschaft, Abfallwirtschaft und Kulturbau:** *Hydraulische Berechnung von naturnahen Fließgewässern: Grundlagen für stationäre, eindimensionale Wasserspiegellagenberechnungen*. Düsseldorf: BWK, 2000.
- [2] **Martin Eckoldt, Hans-Georg Braun:** *Flüsse und Kanäle: Die Geschichte der deutschen Wasserstrassen*. Hamburg: DSV-Verl., 1998.
- [3] **Josef Fürst:** *GIS in Hydrologie und Wasserwirtschaft*. Heidelberg: Wichmann, 2004.
- [4] **Jörn Heppeler, Erich Mattes, Markus Moser, Peter Zeisler:** *"Hydraulische Berechnungen der Hochwassergefahrenkarten"*. WasserWirtschaft, Jahrgang 98, Heft 4, Seite 26–29.
- [5] **Michael Herter, Michael Höck, Michael Jacobi:** *Avenue-Programmierung in ArcView GIS*. Eigenverlag, 2000.
- [6] **Institut für Wasserwirtschaft und Kulturtechnik; Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg:** *Numerische Modelle zur Strömungssimulation*. 1. Auflage. Mannheim: JVA Mannheim Druckerei, 2003.
- [7] **Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg (LUBW):** *Hochwassergefahrenkarte Baden-Württemberg. Projektdokumentation*, 21.06.2008.
- [8] **Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg (LUBW):** *Abfluss-Kennwerte in Baden-Württemberg: Erläuterungsbericht und Software*. 2007.
- [9] **Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg (LFU):** *Gewässergeometrie: Oberirdische Gewässer, Gewässerökologie 46*. Karlsruhe, 1999.
- [10] **Erich Mattes:** *"GIS-Bearbeitung und Datenmanagement"*. WasserWirtschaft, Jahrgang 98, Heft 4, Seite 34–36.
- [11] **Markus Moser, Jürgen Reich:** *"Das Projekt Hochwassergefahrenkarten in Baden-Württemberg"*. WasserWirtschaft, Jahrgang 98, Heft 4, Seite 15–17.
- [12] **Regierungspräsidium Stuttgart:** *Leistungsverzeichnis Hydraulik (HWGK): Datenverarbeitungstechnischer Teil*. 11.01.2007.
- [13] **Thilo Seitz:** *"Erfassung und Bereitstellung der Vermessungsdaten für Hochwassergefahrenkarten"*. WasserWirtschaft, Jahrgang 98, Heft 4, Seite 18–21.
- [14] **Kyne Uhlig:** *Entwicklung eines vereinfachten Verfahrens zur Abgrenzung hochwassergefährdeter Bereiche kleiner Fließgewässer Nordrhein-Westfalens*. Dissertation, Rheinische Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn, 2001.

- [15] **Umweltministerium Baden-Württemberg:** *Hochwassergefahrenkarten in Baden-Württemberg: Leitfaden.* Juli 2005.
- [16] **US Army Corps of Engineers (USACE):** *Accuracy of Computed Water Surface Profiles.* Davis, 1986.
- [17] **US Army Corps of Engineers (USACE):** *HEC-RAS River Analysis System User's Manual: Version 4.0 Beta.* November 2006.
- [18] **US Army Corps of Engineers (USACE):** *HEC-RAS River Analysis System. Hydraulic Reference Manual: Version 4.0.* März 2008.
- [19] **WALD + CORBE:** *Grundsatzstudie - Anforderung an Berechnungsverfahren und Datengrundlagen zur Umgrenzung überschwemmungsgefährdeter Bereich im Sinne des ROG: Erläuterungsbericht.* Hügelsheim, 1999.
- [20] **WALD + CORBE:** *Wasserwirtschaftliche Untersuchung von Umgestaltungsmaßnahmen am Neckar im Bereich der Stadt Horb Teil 1: Nachweis der hydraulischen Auswirkungen einer Fischtreppe und eines Bermenwegs mit Hilfe eines zweidimensionalen hydronumerischen Fließgewässermodells: Erläuterungsbericht.* Hügelsheim, 2006.
- [21] **WALD + CORBE:** *Allgemeine Vorgehensweise zur Ermittlung von Überflutungsflächen und Wassertiefen aus Ergebnissen der hydraulischen Berechnungen.* Hügelsheim, 2007.
- [22] **WALD + CORBE:** *Allgemeine Vorgehensweise zur Erstellung eines 1D-Fließgewässer-modells (HEC-RAS) aus Laserscannerdaten und HWGK-Vermessung.* Hügelsheim, 2007.

Symbolverzeichnis

Symbol	Bezeichnung	Dimension
A	(Einzugsgebiets-) Fläche	m^2
d_{mittel}	Mittlerer Abstand	m
g	Erdbeschleunigung	m/s^2
h	Höhe	m
h_e	Energiehöhe	m
K	Abfuhrfähigkeit	m^3/s
k_{st}	<i>Strickler</i> - Beiwert	$m^{1/3}/s$
l	Länge	m
n	<i>Manning</i> - Beiwert	$s/m^{1/3}$
Q	Abfluss	m^3/s
R	hydraulischer Radius	m
S_f	Reibungsverlustbeiwert	—
v	Fließgeschwindigkeit	m/s
W	Wasserspiegelhöhe	m
α	Geschwindigkeitsbeiwert	—

Abkürzungsverzeichnis

1D	eindimensional
ArcView GIS	Geographisches Informationssystem der Firma ESRI
Avenue	ArcView Gis interne, objektorientierte Programmiersprache
CD	Compact Disc
DGM	digitales Geländemodell
DXF	Abkürzung für „Drawing Interchange Format“; Datenformat für das CAD-Programm (=Computer Aided Design) AutoCAD.
e. V.	eingetragener Verein
engl.	englisch
ESRI	Environmental System Research Institute, Redlands/California
ext	extrem

FP-Creator	Floodplain-Creator (ArcView GIS-Erweiterung des Ingenieurbüros WALD + CORBE)
GIS	Geographisches Informationssystem
Gl.	Gleichung
HEC-RAS	eindimensionales, hydrodynamisch, numerisches Wasserspiegellagenprogramm der US Army Corps of Engineers
HQX, HQ _x	Durchfluss für ein Hochwasser mit einem Wiederkehrintervall von x Jahren
HWGK	Hochwassergefahrenkarten
IWG	Institut für Wasser und Gewässerentwicklung der Universität Karlsruhe
oh.	oberhalb
PDF	Abkürzung für „Portable Document Format“; ein plattformunabhängiges Datenformat für Dokumente
Shape	eigenes Datenformat von ArcView GIS zum Speichern von geometrischen Orts- und Attributsinformationen geographischer Objekte
TBG	offizielle Aufteilung der im Rahmen der HWGK Baden-Württemberg zu untersuchende Gewässer in Teilbearbeitungsgebiete
TIN	Triangulated Irregular Network
ü. NN	über Normalnull
uh.	unterhalb
VAwS	Verordnung über Anlagen zum Umgang mit wassergefährdenden Stoffen und über Fachbetriebe
WG	Wassergesetz
WPROF	einheitliches Datenformat des Landes Baden-Württemberg von Gewässervermessungsdaten
WSP	Wasserspiegel
XS-Creator	Cross Section-Creator (ArcView GIS-Erweiterung des Ingenieurbüros WALD + CORBE)

Abbildungsverzeichnis

Abb. 2.1 Gebietsabgrenzungen nach dem Wassergesetz Baden-Württemberg [15].....	4
Abb. 2.2 Verfahrensschema zur Ermittlung von Überflutungsflächen	7
Abb. 3.1 Ablaufschema des XS-Creators	10
Abb. 3.2 Ablaufschema des FP-Creators.....	12
Abb. 4.1 Ableitung der Bernoulli-Gleichung	14
Abb. 4.2 Querprofilinterpolation von zwei Profilen (grau hinterlegt) mit HEC-RAS	17
Abb. 5.1 Interpolation zwischen zwei Regionalisierungsknoten	22
Abb. 5.2 Zusammenhang der Durchflüsse in der Mündungsformel	23
Abb. 6.1 Lage der Gewässer Neckar, Diessenerbach und Talbach.....	25
Abb. 6.2 Fotografische Aufnahmen des Neckars.....	27
Abb. 6.3 Kalibrierung des hydraulischen Neckarmodells	29
Abb. 6.4 Überflutungstiefen (HQ ₁₀₀) für die Ortslage Dettingen	33
Abb. 6.5 Überflutungstiefen (HQ ₁₀₀) für das Stadtgebiet Horb am Neckar	35
Abb. 6.6 Fotografische Aufnahmen des Diessenerbachs	38
Abb. 6.7 Überflutungstiefen (HQ ₁₀₀) für die Ortslage Diessen	42
Abb. 6.8 Einlauf Verdolung Hochbergstr. 46.....	43
Abb. 6.9 Einlauf kurze Verdolung uh. Hochbergstr	44
Abb. 6.10 Einlauf lange Verdolung uh. Hochbergstr.	44
Abb. 6.11 Fotografische Aufnahmen des Talbachs	45
Abb. 6.12 Brücke Rathausstraße	47
Abb. 6.13 Überflutungstiefen (HQ ₁₀₀) für die Ortslage Mühlen.....	49
Abb. 7.1 fehlerhafte Geländehöhen in einem DGM-Querprofil des Neckars.....	51
Abb. 7.2 mögliche Fehler bei der Interpolation von Zwischenprofilen	52
Abb. 7.3 Vergleich von DGM-Querprofilen und DGM/Vermessungsprofilen am Neckar	54
Abb. 7.4 Prinzipskizze zur Interpolation von Zusatzprofilen	55
Abb. 7.5 mögliche Probleme bei der Interpolation von Zusatzprofilen	57
Abb. 7.6 Menü-Leiste im ArcView GIS mit XS-Zusatzprofile.....	58
Abb. 7.7 Ablaufschema von XS-Zusatzprofile und dem XS-Creator	59
Abb. 7.8 XS-Zusatzprofile: „Zusatzprofile erzeugen“	60
Abb. 7.9 XS-Zusatzprofile: „Wasserspiegel ermitteln“	61
Abb. 7.10 XS-Zusatzprofile: „Wasserspiegel interpolieren“	61
Abb. 7.11 Vergleich von DGM-Profil und dem Profil aus XS-Zusatzprofile	62
Abb. 8.1 Fotografische Aufnahmen des Gewässerabschnitts Neckar uh. Mühlen	68
Abb. 8.2 Neckar uh. Mühlen: Längsprofil der Wasserspiegelabweichungen für die Varianten A, B, C (ohne Zusatzprofile)	69

Abb. 8.3 Neckar uh. Mühlen: Flächenausbreitung für Variante A, B, C (ohne Zusatzprofile)	70
Abb. 8.4 Prinzipskizze zur Veranschaulichung des Überflutungsflächenvergleichs zwischen Referenzzustand und Varianten	71
Abb. 8.5 Neckar uh. Mühlen: Längsprofil der Wasserspiegelabweichungen für die Varianten A, B, C (mit Zusatzprofilen)	72
Abb. 8.6 Fotografische Aufnahmen des Gewässerabschnitts Neckar bei Horb	74
Abb. 8.7 Neckar bei Horb: Längsprofil der Wasserspiegelabweichungen für die Varianten A, B, C (ohne Zusatzprofile)	75
Abb. 8.8 Neckar bei Horb: Flächenausbreitung für Variante A, B, C (ohne Zusatzprofile)	77
Abb. 8.9 Neckar bei Horb: Längsprofil der Wasserspiegelabweichungen für die Varianten A, B, C (mit Zusatzprofilen)	79
Abb. 8.10 Fotografische Aufnahmen des Gewässerabschnitts Neckar bei Horb	81
Abb. 8.11 Talbach: Längsprofil der Wasserspiegelabweichungen für die Varianten A, B, C (ohne Zusatzprofile)	82
Abb. 8.12 Talbach: Flächenausbreitung für Variante A, B, C (ohne Zusatzprofile)	84
Abb. 8.13 Talbach: Längsprofil der Wasserspiegelabweichungen für die Varianten A, B, C (mit Zusatzprofilen)	86

Tabellenverzeichnis

Tab. 6.1 Gewässer-ID der Gewässer Neckar, Diessenerbach und Talbach	26
Tab. 6.2 Maßgebende HQ-Abflüsse für den Neckar	28
Tab. 6.3 Stricklerbeiwerte für den Neckar	31
Tab. 6.4 Untere Randbedingungen für den Neckar	32
Tab. 6.5 Einstau der Brücken für den Neckar	32
Tab. 6.6 Maßgebende HQ-Abflüsse für den Diessenerbach	39
Tab. 6.7 Stricklerbeiwerte für den Diessenerbach	39
Tab. 6.8 Untere Wasserstandsrandbedingungen für den Diessenerbach unter Anwendung der Mündungsformel	40
Tab. 6.9 Einstau der Brücken und Verdolungen für den Diessenerbach	41
Tab. 6.10 Maßgebende HQ-Abflüsse für den Talbach	46
Tab. 6.11 Stricklerbeiwerte für den Talbach	46
Tab. 6.12 Untere Wasserstandsrandbedingungen für den Talbach unter Anwendung der Mündungsformel	47
Tab. 6.13 Einstau der Brücken für den Talbach	48
Tab. 8.1 gewählte Gewässerstrecken für Untersuchung zur Minimierung des Vermessungsaufwands	67
Tab. 8.2 Neckar uh. Mühlen: Querprofilabstände der Variante A, B, C	68
Tab. 8.3 Neckar uh. Mühlen: Flächenabweichungen für Variante A, B, C (ohne Zusatzprofile)	70
Tab. 8.4 Neckar uh. Mühlen: Wasserspiegelabweichungen vom Referenzzustand für Variante A, B, C (mit und ohne Zusatzprofile)	73
Tab. 8.5 Neckar bei Horb: Querprofilabstände der Variante A, B, C	74
Tab. 8.6 Neckar bei Horb: Flächenabweichungen für Variante A, B, C (ohne Zusatzprofile)	76
Tab. 8.7 Neckar bei Horb: Wasserspiegelabweichungen vom Referenzzustand für Variante A, B, C (mit und ohne Zusatzprofile)	80
Tab. 8.8 Talbach: Querprofilabstände der Variante A, B, C	81
Tab. 8.9 Talbach: Flächenabweichungen für Variante A, B, C (ohne Zusatzprofile)	83
Tab. 8.10 Talbach: Wasserspiegelabweichungen vom Referenzzustand für Variante A, B, C (mit und ohne Zusatzprofile)	86

Anlagenverzeichnis

Zu Kapitel 3: Geoinformationssysteme

- A.1 Erläuterungen zum XS-Creator [22]
- A.2 Erläuterungen zum FP-Creator [21]

Zu Kapitel 5: Datengrundlagen

- B.1 Lage und Bezeichnung der hydrologischen Knotenpunkte

Zu Kapitel 6: Erstellung von Hochwassergefahrenkarten im TBG 402

- C.1.1 Neckar: Einzugsgebiete
- C.1.2 Neckar: Interpolation der HQ-Abflüsse
- C.1.3 Neckar: Wasserspiegellängsschnitt 02345-01 (HWGK)
- C.1.4 Neckar: Wasserspiegellängsschnitt 02345-02 (HWGK)
- C.1.5 Neckar: Wasserspiegellängsschnitt 02345-03 (HWGK)

- C.2.1 Diessenerbach: Einzugsgebiete
- C.2.2 Diessenerbach: Interpolation der HQ-Abflüsse
- C.2.3 Diessenerbach: Wasserspiegellängsschnitt 02086-01 (HWGK)
- C.2.4 Diessenerbach: Wasserspiegellängsschnitt 02086-02 (HWGK)
- C.2.5 Diessenerbach: Wasserspiegellängsschnitt 02086-03 (HWGK)
- C.2.6 Diessenerbach: Wasserspiegellängsschnitt 02086-04 (HWGK)
- C.2.7 Diessenerbach: Wasserspiegellängsschnitt 02086-05 (HWGK)
- C.2.8 Diessenerbach: Wasserspiegellängsschnitt 02086-06 (HWGK)

- C.3.1 Talbach: Einzugsgebiet
- C.3.2 Talbach: Wasserspiegellängsschnitt 02093-01 (HWGK)

Zu Kapitel 8: Untersuchung zur Einschränkung der Vermessungsabstände

- D.1.1 Neckar uh. Mühlen: Lage der Querprofile im Referenzzustand
- D.1.2 Neckar uh. Mühlen: Querprofile der Variante A, B, C
- D.1.3 Neckar uh. Mühlen: Wasserspiegellängsschnitt für die Varianten A, B und C (ohne Zusatzprofile)
- D.1.4 Neckar uh. Mühlen: Querprofilgeometrienvergleich Referenzzustand und Variante A mit Zusatzprofilen durch XS-Creator
- D.1.5 Neckar uh. Mühlen: Querprofilgeometrienvergleich für Referenzzustand und Variante B mit Zusatzprofilen durch XS-Creator
- D.1.6 Neckar uh. Mühlen: Querprofilgeometrienvergleich für Referenzzustand und Variante C mit Zusatzprofilen durch XS-Creator
- D.1.7 Neckar uh. Mühlen: Wasserspiegellängsschnitt für Variante A

- D.1.8 Neckar uh. Mühlen: Wasserspiegellängsschnitt für Variante B
- D.1.9 Neckar uh. Mühlen: Wasserspiegellängsschnitt für Variante C

- D.2.1 Neckar bei Horb: Lage der Querprofile im Referenzzustand
- D.2.2 Neckar bei Horb: Querprofile der Variante A, B, C
- D.2.3 Neckar bei Horb: Wasserspiegellängsschnitt für die Varianten A, B und C (ohne Zusatzprofile)
- D.2.4 Neckar bei Horb: Querprofilgeometrienvergleich für Referenzzustand und Variante A mit Zusatzprofilen durch XS-Creator
- D.2.5 Neckar bei Horb: Querprofilgeometrienvergleich für Referenzzustand und Variante B mit Zusatzprofilen durch XS-Creator
- D.2.6 Neckar bei Horb: Querprofilgeometrienvergleich für Referenzzustand und Variante C mit Zusatzprofilen durch XS-Creator
- D.2.7 Neckar bei Horb: Wasserspiegellängsschnitt für Variante A
- D.2.8 Neckar bei Horb: Wasserspiegellängsschnitt für Variante B
- D.2.9 Neckar bei Horb: Wasserspiegellängsschnitt für Variante C

- D.3.1 Talbach: Lage der Querprofile im Referenzzustand
- D.3.2 Talbach: Querprofile der Variante A, B, C
- D.3.3 Talbach: Wasserspiegellängsschnitt für die Varianten A, B und C (ohne Zusatzprofile)
- D.3.4 Talbach: Querprofilgeometrienvergleich für Referenzzustand und Variante A mit Zusatzprofilen durch XS-Creator
- D.3.5 Talbach: Querprofilgeometrienvergleich für Referenzzustand und Variante B mit Zusatzprofilen durch XS-Creator
- D.3.6 Talbach: Querprofilgeometrienvergleich für Referenzzustand und Variante C mit Zusatzprofilen durch XS-Creator
- D.3.7 Talbach: Wasserspiegellängsschnitt für Variante A
- D.3.8 Talbach: Wasserspiegellängsschnitt für Variante B
- D.3.9 Talbach: Wasserspiegellängsschnitt für Variante C

Hochwassergefahrenkarten:

- E.1.1 HWGK Diessenerbach/Neckar: Korrigierte Flächenausbreitung für HQ_{10, 20, 50, 100, ext}
- E.1.2 HWGK Diessenerbach/Neckar: Korrigierte Überflutungstiefen für HQ₁₀₀

- E.2.1 HWGK Neckar: Korrigierte Flächenausbreitung für HQ_{10, 20, 50, 100, ext}
- E.2.2 HWGK Neckar: Korrigierte Überflutungstiefen für HQ₁₀₀

- E.3.1 HWGK Talbach/Neckar: Korrigierte Flächenausbreitung für HQ_{10, 20, 50, 100, ext}
- E.3.2 HWGK Diessenerbach/Neckar: Korrigierte Überflutungstiefen für HQ₁₀₀

Selbstständigkeitserklärung

Ich erkläre, dass ich die vorliegende Arbeit selbständig und nur unter Verwendung der angegebenen Quellen und Hilfsmittel angefertigt habe.

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'K. Braun'.

B. Sc. Katinka Braun

Ringsheim, den 19. Januar

BAUHAUS - UNIVERSITÄT WEIMAR

**FAKULTÄT BAUINGENIEURWESEN
INSTITUT FÜR WASSERWESEN
LEHRSTUHL FÜR STRÖMUNGSMECHANIK**

„Optimierung der Methodik zur Erstellung von
Hochwassergefahrenkarten durch verbesserte Nutzung
hochaufgelöster digitaler Geländemodelle“

Anlage A - D

B. Sc. Katinka Braun

Januar 2009

Anlagen

Zu Kapitel 3: Geoinformationssysteme

- A.1 Erläuterungen zum XS-Creator [22]
- A.2 Erläuterungen zum FP-Creator [21]

Zu Kapitel 5: Datengrundlagen

- B.1 Lage und Bezeichnung der hydrologischen Knotenpunkte

Zu Kapitel 6: Erstellung von Hochwassergefahrenkarten im TBG 402

- C.1.1 Neckar: Einzugsgebiete
- C.1.2 Neckar: Interpolation der HQ-Abflüsse
- C.1.3 Neckar: Wasserspiegellängsschnitt 02345-01 (HWGK)
- C.1.4 Neckar: Wasserspiegellängsschnitt 02345-02 (HWGK)
- C.1.5 Neckar: Wasserspiegellängsschnitt 02345-03 (HWGK)

- C.2.1 Diessenerbach: Einzugsgebiete
- C.2.2 Diessenerbach: Interpolation der HQ-Abflüsse
- C.2.3 Diessenerbach: Wasserspiegellängsschnitt 02086-01 (HWGK)
- C.2.4 Diessenerbach: Wasserspiegellängsschnitt 02086-02 (HWGK)
- C.2.5 Diessenerbach: Wasserspiegellängsschnitt 02086-03 (HWGK)
- C.2.6 Diessenerbach: Wasserspiegellängsschnitt 02086-04 (HWGK)
- C.2.7 Diessenerbach: Wasserspiegellängsschnitt 02086-05 (HWGK)
- C.2.8 Diessenerbach: Wasserspiegellängsschnitt 02086-06 (HWGK)

- C.3.1 Talbach: Einzugsgebiet
- C.3.2 Talbach: Wasserspiegellängsschnitt 02093-01 (HWGK)

Zu Kapitel 8: Untersuchung zur Einschränkung der Vermessungsabstände

- D.1.1 Neckar uh. Mühlen: Lage der Querprofile im Referenzzustand
- D.1.2 Neckar uh. Mühlen: Querprofile der Variante A, B, C
- D.1.3 Neckar uh. Mühlen: Wasserspiegellängsschnitt für die Varianten A, B und C (ohne Zusatzprofile)
- D.1.4 Neckar uh. Mühlen: Querprofilgeometrienvergleich Referenzzustand und Variante A mit Zusatzprofilen durch XS-Creator
- D.1.5 Neckar uh. Mühlen: Querprofilgeometrienvergleich für Referenzzustand und Variante B mit Zusatzprofilen durch XS-Creator
- D.1.6 Neckar uh. Mühlen: Querprofilgeometrienvergleich für Referenzzustand und Variante C mit Zusatzprofilen durch XS-Creator
- D.1.7 Neckar uh. Mühlen: Wasserspiegellängsschnitt für Variante A
- D.1.8 Neckar uh. Mühlen: Wasserspiegellängsschnitt für Variante B
- D.1.9 Neckar uh. Mühlen: Wasserspiegellängsschnitt für Variante C

- D.2.1 Neckar bei Horb: Lage der Querprofile im Referenzzustand
- D.2.2 Neckar bei Horb: Querprofile der Variante A, B, C
- D.2.3 Neckar bei Horb: Wasserspiegellängsschnitt für die Varianten A, B und C (ohne Zusatzprofile)
- D.2.4 Neckar bei Horb: Querprofilgeometrienvergleich für Referenzzustand und Variante A mit Zusatzprofilen durch XS-Creator
- D.2.5 Neckar bei Horb: Querprofilgeometrienvergleich für Referenzzustand und Variante B mit Zusatzprofilen durch XS-Creator
- D.2.6 Neckar bei Horb: Querprofilgeometrienvergleich für Referenzzustand und Variante C mit Zusatzprofilen durch XS-Creator
- D.2.7 Neckar bei Horb: Wasserspiegellängsschnitt für Variante A
- D.2.8 Neckar bei Horb: Wasserspiegellängsschnitt für Variante B
- D.2.9 Neckar bei Horb: Wasserspiegellängsschnitt für Variante C

- D.3.1 Talbach: Lage der Querprofile im Referenzzustand
- D.3.2 Talbach: Querprofile der Variante A, B, C
- D.3.3 Talbach: Wasserspiegellängsschnitt für die Varianten A, B und C (ohne Zusatzprofile)
- D.3.4 Talbach: Querprofilgeometrienvergleich für Referenzzustand und Variante A mit Zusatzprofilen durch XS-Creator
- D.3.5 Talbach: Querprofilgeometrienvergleich für Referenzzustand und Variante B mit Zusatzprofilen durch XS-Creator
- D.3.6 Talbach: Querprofilgeometrienvergleich für Referenzzustand und Variante C mit Zusatzprofilen durch XS-Creator
- D.3.7 Talbach: Wasserspiegellängsschnitt für Variante A
- D.3.8 Talbach: Wasserspiegellängsschnitt für Variante B
- D.3.9 Talbach: Wasserspiegellängsschnitt für Variante C

Allgemeine Vorgehensweise zur Erstellung eines 1D-Fließgewässermodells (HEC-Ras) aus Laserscannerdaten und HWGK-Vermessung

Für die teilautomatisierte Erstellung von eindimensionalen Fließgewässermodellen aus Laserscannerdaten und HWGK-Vermessung wurde vom Ing.-Büro WALD+CORBE eigenes ein leistungsstarkes GIS-Werkzeug entwickelt. Das Programm „Cross-Section Creator“ unterstützt den erfahrenen Hydrauliker wirkungsvoll bei der im folgenden beschriebenen Erzeugung von Modellgeometrien für das 1D-Wasserspiegelberechnungsprogramm HEC-Ras.

Wesentliche Datengrundlage für die hydraulischen Fließgewässermodelle bildet die flächendeckende Laserscannervermessung sowie die HWGK-Querprofilvermessung im Bereich des Gewässerschlauchs. Da die HWGK-Vermessung vom Vermesser im WPROF ASCII-Format bereitgestellt wird, müssen die Daten zunächst in ein GIS-Format (Shape) überführt werden. Im Rahmen dieser Wandlung werden neben den Vermessungspunkten auch Lagelinien der Gewässerquerprofile bzw. der Verbundprofile im Shape-Format erzeugt.

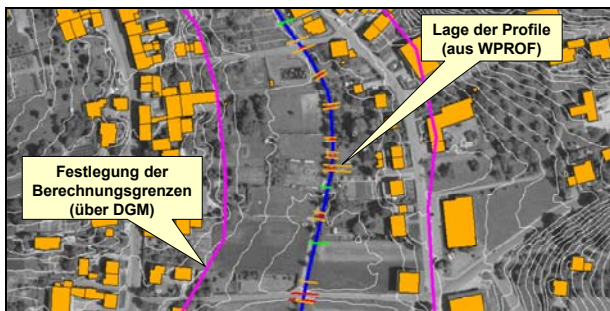


Bild 1: Lage der Profile u. Festlegung der Berechnungsgrenzen

Die vorgegebenen Profillagelinien werden bis an den Rand des Untersuchungsbereichs verlängert. Hierzu wird auf Basis der Laserscannerdaten eine linke und rechte Berechnungsgrenze festgelegt. Die Profilverlängerung und Ausrichtung an den Modellrändern erfolgt teilautomatisiert mit Hilfe des Programms „Cross-Section Creator“.



Bild 4: Verlängerung der Querprofile

Mit Hilfe des GIS-Werkzeuges werden nun aus dem digitalen Geländemodell der Laserscannervermessung, das entweder im Raster- oder TIN-Format vorliegt, entlang der verlängerten Profillagelinien Querprofile herausgeschnitten (3D-Shapes). Wie in Bild 4 dargestellt, erfolgt anschließend das „Einmischen“ der HWGK-Querprofilvermessungsdaten in diese Profile. Das Einmischen von

Vermessungspunkten ist sowohl über Profilnummer und Querstation als auch alleinig über die Lagekoordinate möglich.

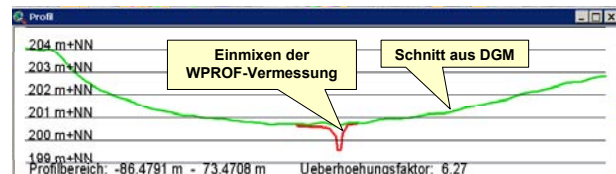


Bild 4: Einmischen der HWGK-Vermessung in den DGM-Schnitt

Für die gesonderte Berücksichtigung von Abflusshindernissen werden größere zusammenhängende bebaute Bereiche im GIS separat durch Polygone erfasst. Die Abgrenzung der abflussunwirksamen Bereiche erfolgt manuell unter Berücksichtigung der generellen Fließrichtung.

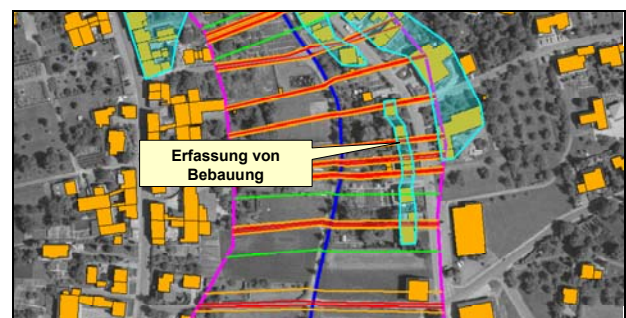


Bild 4: Erfassung von Bebauung

Die Ausgabe der Querprofile erfolgt im HEC-Ras Datenformat. Der vorgegebene Datenstandard der HWGK-Vermessung ermöglicht es, auch Sonderbauwerke direkt im HEC-Ras Datenformat auszugeben. Als Ergebnis des Preprocessings entsteht eine weitgehend fertige Modellgeometrie für HEC-Ras, die Gewässerachsen, gegliederte Querprofile, Bauwerke, Abflusshindernisse sowie Verknüpfungen zu Bildern und Bauwerksskizzen enthält.

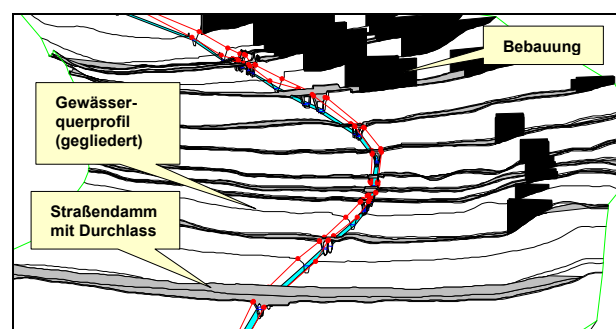


Bild 4: Ergebnis des GIS-Preprocessings (3D-Ansicht HEC-Ras)

Allgemeine Vorgehensweise zur Ermittlung von Überflutungsflächen und Wassertiefen aus Ergebnissen der hydraulischen Berechnungen

Die hydraulischen Fließgewässermodelle liefern je nach Modelltyp (1D oder 2D) entweder an den vorgegebenen Querprofilstützstellen oder an den Knotenpunkten des Berechnungsnetzes die Wasserspiegellagen am Gewässer. Zur Erzeugung von Überflutungsgrenzen und Wassertiefen müssen diese berechneten Wasserspiegellagen mit dem Gelände verschnitten werden um anschließend eine Filterung und Glättung der erzeugten Flächen durchführen zu können. Die Überflutungsflächenermittlung erfolgt komplett GIS-basiert mit Hilfe des vom Ing.-Büro WALD+ CORBE entwickelten Programms „Floodplain Creator“.

Das Programm ermöglicht einen direkten Import aus den hydraulischen Berechnungsprogrammen HEC-Ras, Hydret und Hydro_AS-2D. Beim Import von 1D-Berechnungsergebnissen (HEC-Ras, Hydret) wird ein Linienthema erzeugt, das die Lage der Querprofile abbildet und gleichzeitig in Attributform sämtliche Ergebnisse der Wasserspiegellagenberechnungen beinhaltet. Beim Import von 2D-Berechnungsergebnissen (Hydro_AS-2D) werden getrennt für jedes berechnete Hochwasser die Wasserspiegellagen entsprechend des Berechnungsnetzes als 3D-Kanten ausgegeben.

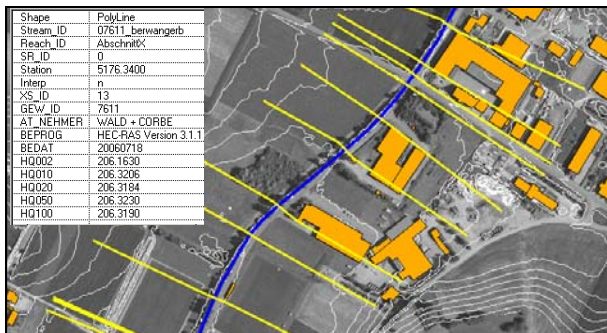


Bild 1: Import von Berechnungsergebnissen aus HEC-Ras



Bild 2: Import von Berechnungsergebnissen aus Hydro_AS-2D

Auf Grundlage der mit Wasserständen belegten Querprofile bzw. auf Basis der 3D-Kanten erfolgt die Erzeugung einer Wasseroberfläche im ESRI TIN-Format. Durch die Vorgabe eines Umgrenzungspolygons, das sich unmittelbar aus den Querprofilendpunkten ergibt, wird bei der 1D-Modellauswertung verhindert, dass bei der Oberflächenerzeugung in Innenkurvenbereichen die Wasserspiegellagen weit voneinander entfernter Profile direkt miteinander verbunden werden.

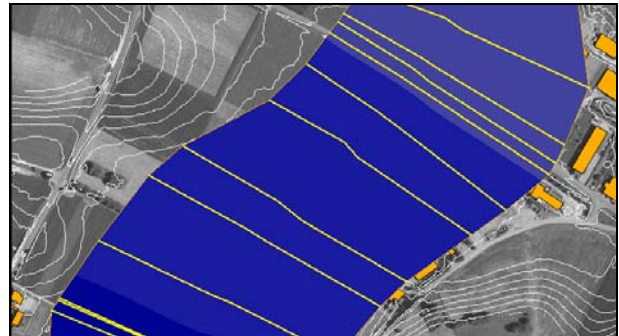


Bild 3: Erzeugte Wasserspiegeloberfläche (TIN)

Die erzeugte Wasseroberfläche wird im nächsten Schritt mit dem vorgegebenen digitalen Geländemodell, das in Form eines TINs oder als Raster vorliegen kann, verschnitten. Da die eigentliche Verschnidung rasterbasiert erfolgt, müssen Wasserspiegel- und Gelände-TINs zunächst intern in ein Rasterformat überführt werden. Als Ergebnis der Verschnidung ergibt sich ein Wassertiefenraster aus dem sich die Überflutungsgrenzen unmittelbar ableiten lassen. Für eine genaue Abgrenzung der Überflutungsbereiche werden neben den Wassertiefenrastern auch die hieraus hervorgehenden Überflutungsflächen direkt als Polygone erzeugt.

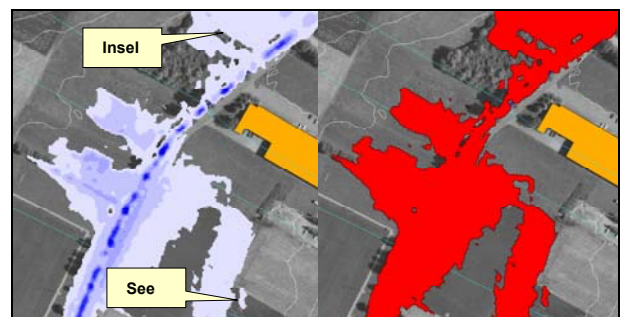


Bild 4: Ergebnis der Verschnidung der Wasseroberfläche mit dem DGM, Wassertiefenraster (links) und Überflutungspolygone (rechts)

Es fällt auf, dass die Verschnidung der Wasseroberfläche mit dem DGM teilweise zu sehr kleinen Seen- und Inseln führt. Teils sind Gebiete auch nur mit einer sehr geringen Wassertiefe überflutet. Um diese Flächen zu entfernen wird im Anschluss an die Überflutungsflächenenerzeugung eine Filterung der Überflutungsflächen durchgeführt.

Die Filterung erfolgt anhand der Kriterien „Flächengröße“ und „mittlere Wassertiefe“. Entsprechend Bild 5 wurden verschiedene Filterklassen definiert, die als Ausschlusskriterium für die Flächenfilterung dienen. Ein weiteres wichtiges Kriterium für die Flächenfilterung stellt die Gewässerachse dar. Um im unmittelbaren Umfeld des Gewässers keine Überflutungsflächen zu verlieren, bleiben Seen, die die Gewässerachse schneiden, bei der Filterung stets erhalten.

Filterkriterien

Ausschlusskriterium fuer Seen (ueberflutete Bereiche mit positiven Wassertiefen)

Klasse	Fläche zwischen	Mittlere Tiefe (Mean)
Klasse S1:	0 und 30 m²	< -9999 m
Klasse S2:	30 und 100 m²	< -0.10 m
Klasse S3:	100 und 200 m²	< -0.06 m
Klasse S4:	200 und 500 m²	< -0.05 m
Klasse S5:	500 und 10000 m²	< -0.03 m

Ausschlusskriterium fuer Inseln (nicht ueberflutete Bereiche mit negativen Wassertiefen)

Klasse	Fläche zwischen	Mittlere Tiefe (Mean)
Klasse I1:	0 und 100 m²	> -9999 m
Klasse I2:	100 und 200 m²	> -0.10 m
Klasse I3:	200 und 10000 m²	> -0.03 m
Klasse I4:	10000 und 10000 m²	> 0 m
Klasse I5:	10000 und 10000 m²	> 0 m

Alle Eingaben auf Standardwerte zuruecksetzen OK Cancel

Bild 5: Filterkriterien für den Ausschluss von Seen bzw. Inseln

Um die Filterkriterien auf die Überflutungspolygone anwenden zu können, müssen zusammengesetzte Polygone (Seen mit Inseln) zunächst in ihre Einzelkomponenten aufgeschlüsselt werden. Danach ist eine automatische Klassifizierung der Einzelflächen durchführbar, aus der hervorgeht, welche Flächen als Überflutungsflächen beibehalten werden sollen und welche nicht. Das Ergebnis der Klassifizierung kann visuell geprüft und gegebenenfalls manuell korrigiert werden.

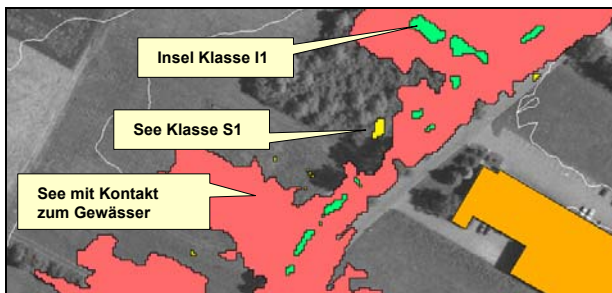


Bild 6: Analyse der Einzelpolygone

Nach Festlegung der auszusortierenden Seen und Inseln werden die verbleibenden Einzelflächen wieder zu komplexeren Polygonen (Seen mit Inseln) zusammengesetzt. Gleichzeitig erfolgt eine Korrektur der Wassertiefenraster. Rasterzellen im Bereich von Seen, die aussortiert wurden, werden auf eine Wassertiefe von -1cm gesetzt. Im Bereich von gefilterten Inseln wird eine Wassertiefe von +1 cm angesetzt.

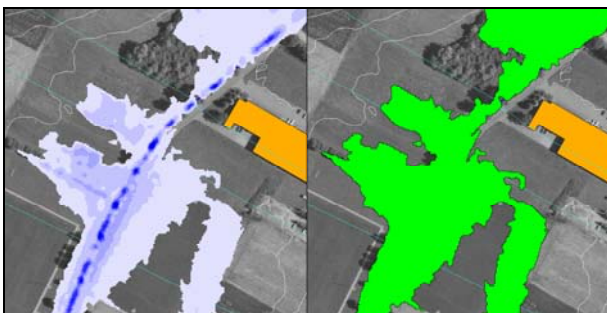


Bild 7: Ergebnis der Flächenfilterung, Wassertiefenraster (links) und Überflutungspolygone (rechts)

Da die Überflutungsgrenzen aus dem Raster abgeleitet werden, entstehen zwangsläufig sehr eckige Linienzüge. Diese können durch eine einfache Kantenglättung deutlich verbessert werden. Bei der Kantenglättung werden, wie in Bild 8 dargestellt, alle Ecken im 45° Winkel abgeschnitten. Der Vorteil dieser Methodik liegt gegenüber anderen Ausdünnungsalgorithmen darin, dass die Methodik einfach nachzuvollziehen ist, keine wesentlichen Strukturen verloren gehen und außerdem keine erneute Korrektur der Tiefenraster erforderlich ist

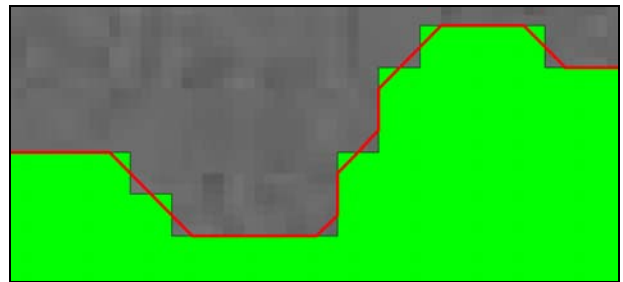


Bild 8: Kantenglättung

Zusammenfassend ist die Wirkungsweise der Filterung und Glättung von Überflutungsflächen in Bild 9 nochmals anschaulich im Vergleich zum ursprünglichen Zustand dargestellt.

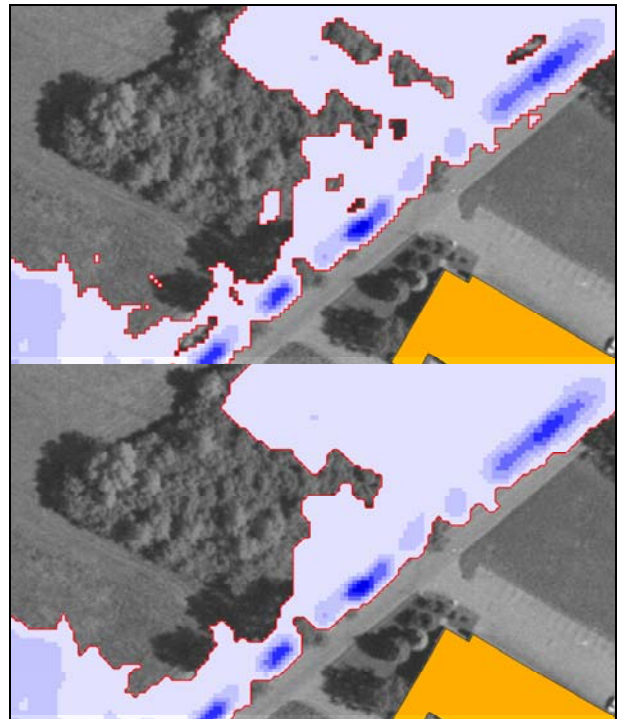
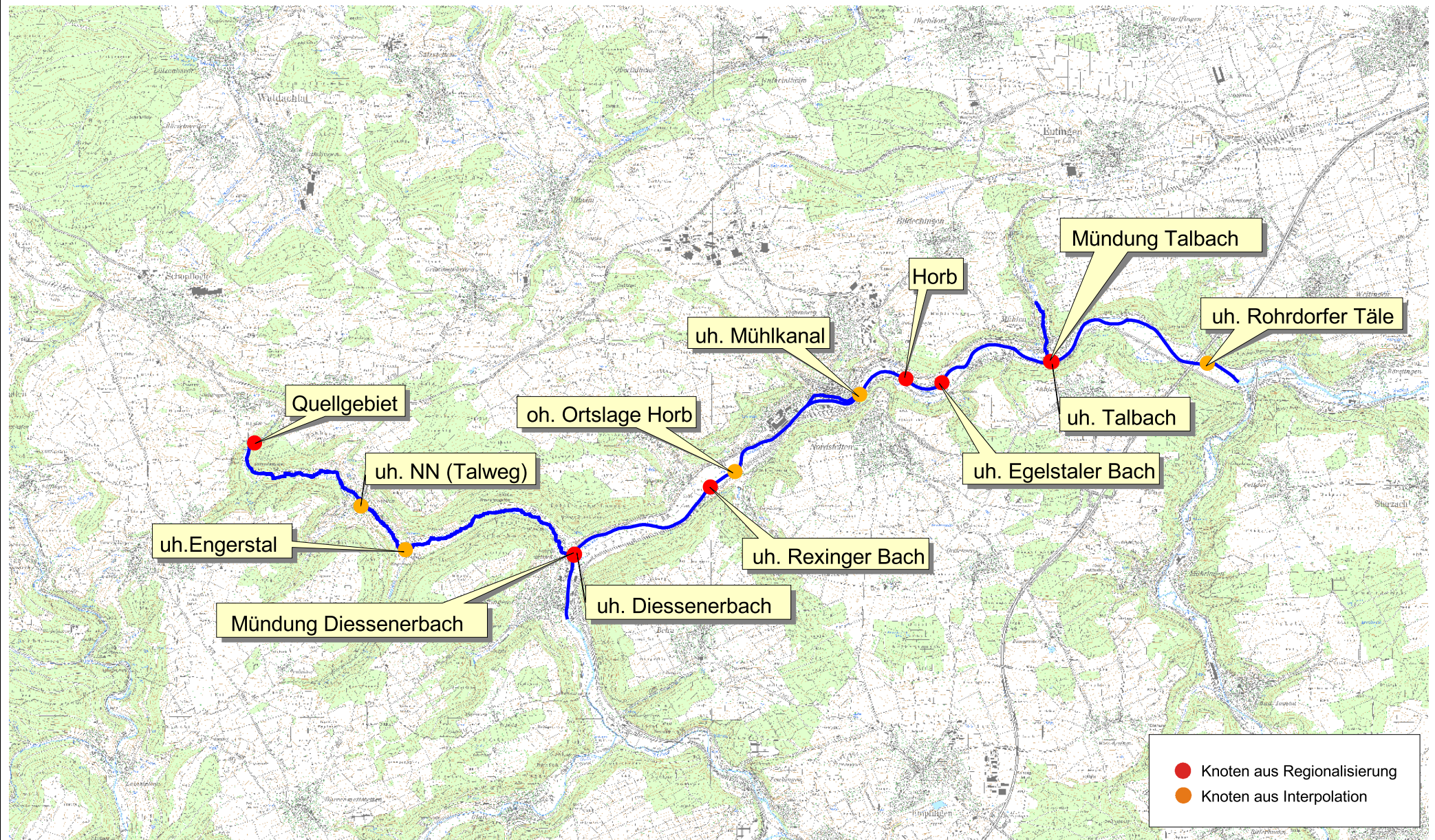
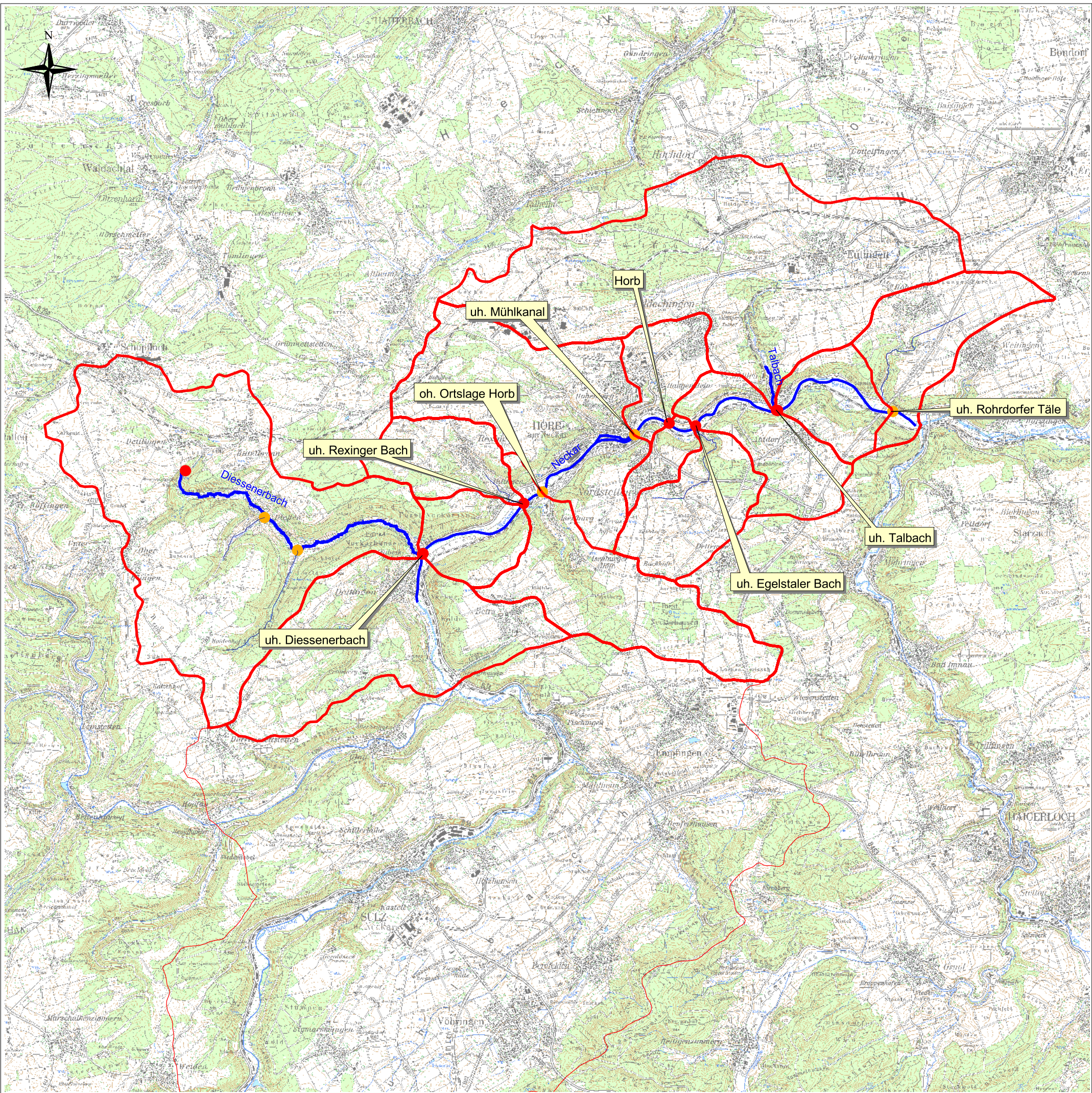


Bild 9: Wirkungsweise der Filterung und Glättung, oben: Wassertiefenraster und Umrisspolygon aus Verschneidung, unten: Wassertiefenraster und Umrisspolygon nach Filterung und Glättung

Anlage B.1 Lage und Bezeichnung der hydrologischen Knotenpunkte





Anlage C.1.1 Neckar: Einzugsgebiete

Legende:

- Gewässerachsen (Bearbeitungsgebiet)
- Einzugsgebietsgrenzen Neckar (Bearbeitungsgebiet)
- Einzugsgebietsgrenzen Neckar (außerhalb Bearbeitungsgebiet)
- Knoten aus Regionalisierung
- Knoten aus Interpolation

HWGK TBG 402

Neckar (Bereich Horb)

- Lage der Einzugsgebiete -

Maßstab:		Datum	Name
1:80 000	Bearb.	26.11.2008	Braun
	Gepr.		
Projektnr.:			
Zeichnung:			
Auftraggeber:	Ingenieurbüro:		
Datum	Unterschrift	Datum	Unterschrift

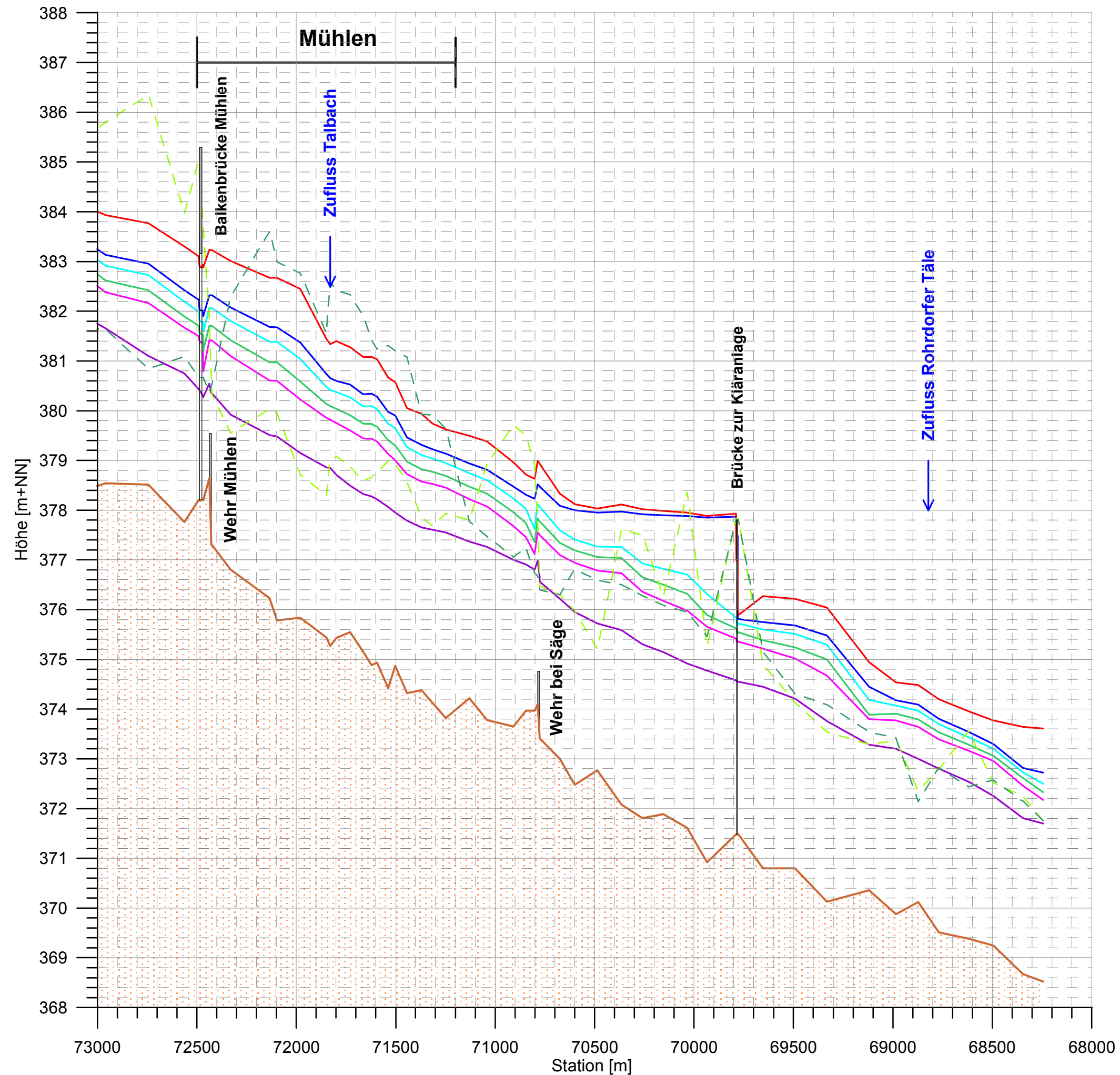
Anlage C.1.2 Neckar: Interpolation der HQ-Abflüsse

Gewässer:	Neckar		
Knoten_{ges}:	uh. Rexinger Bach	A_{ges} [km²]:	1095.84
Knoten_{Oberlauf}:	Horb	A_{oberlauf} [km²]:	1086.16
Knoten_{Unterlauf}:	oh. Ortslage Horb	A_{unterlauf} [km²]:	1112.54
	Knoten _{Oberlauf}	Knoten _{Unterlauf}	Knoten _{gesucht} *
HQ ₂ [m³/s]	184.21	190.90	186.66
HQ ₁₀ [m³/s]	334.67	345.80	338.75
HQ ₂₀ [m³/s]	394.51	406.92	399.06
HQ ₅₀ [m³/s]	473.88	487.61	478.92
HQ ₁₀₀ [m³/s]	534.94	549.42	540.25
HQ _{EXT} [m³/s]	784.00	785.00	784.37

Gewässer:	Neckar		
Knoten_{ges}:	uh. Rexinger Bach	A_{ges} [km²]:	1109.27
Knoten_{Oberlauf}:	Horb	A_{oberlauf} [km²]:	1086.16
Knoten_{Unterlauf}:	uh. Mühlkanal	A_{unterlauf} [km²]:	1112.54
	Knoten _{Oberlauf}	Knoten _{Unterlauf}	Knoten _{gesucht} *
HQ ₂ [m³/s]	184.21	190.90	190.07
HQ ₁₀ [m³/s]	334.67	345.80	344.42
HQ ₂₀ [m³/s]	394.51	406.92	405.38
HQ ₅₀ [m³/s]	473.88	487.61	485.91
HQ ₁₀₀ [m³/s]	534.94	549.42	547.63
HQ _{EXT} [m³/s]	784.00	785.00	784.88

Gewässer:	Neckar		
Knoten_{ges}:	uh. Talbach	A_{ges} [km²]:	1155.51
Knoten_{Oberlauf}:	oh. Eyach	A_{oberlauf} [km²]:	1151.89
Knoten_{Unterlauf}:	uh. Rohrdorfer Täle	A_{unterlauf} [km²]:	1161.85
	Knoten _{Oberlauf}	Knoten _{Unterlauf}	Knoten _{gesucht} *
HQ ₂ [m³/s]	194.46	198.25	195.84
HQ ₁₀ [m³/s]	353.13	358.13	354.95
HQ ₂₀ [m³/s]	415.81	420.93	417.67
HQ ₅₀ [m³/s]	498.60	503.64	500.43
HQ ₁₀₀ [m³/s]	562.03	566.84	563.78
HQ _{EXT} [m³/s]	787.00	794.00	789.54

* Berechnung nach Gl. 5.4



Anlage C.1.3

Legende:

- WSP HQextrem
- WSP HQ100
- WSP HQ050
- WSP_HQ020
- WSP HQ010
- WSP HQ002
- OK Mittelwasserbett links
- OK Mittelwasserbett rechts
- Sohle

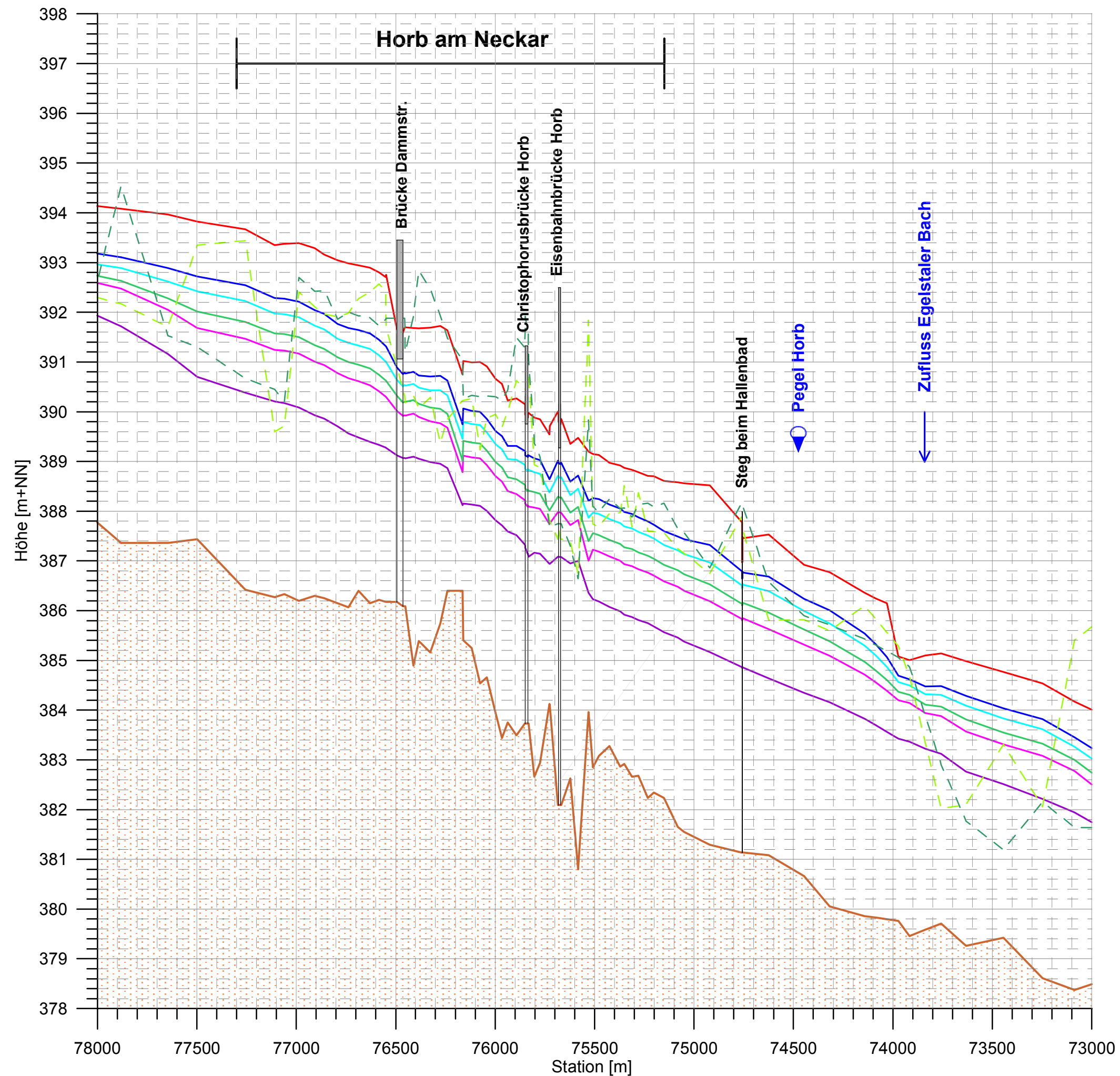
Diplomarbeit Katinka Braun
Bauhaus-Universität Weimar



**Hochwassergefahrenkarte
TBG 402, Neckar**

**Wasserspiegellängsschnitt
02345_01 Neckar
Ist-Zustand**

Maßstab:	Höhe 1 : 80 Länge 1 : 20 000		Datum	Name
		bearbeitet:	18.09.2008	K. Braun
		geprüft:		
Projekt-Nr.:				
Zeichnung: LS_HQlst_02345_01.grf				



Anlage C.1.4

Legende:

- WSP HQextrem
- WSP HQ100
- WSP HQ050
- WSP_HQ020
- WSP HQ010
- WSP HQ002
- OK Mittelwasserbett links
- OK Mittelwasserbett rechts
- Sohle

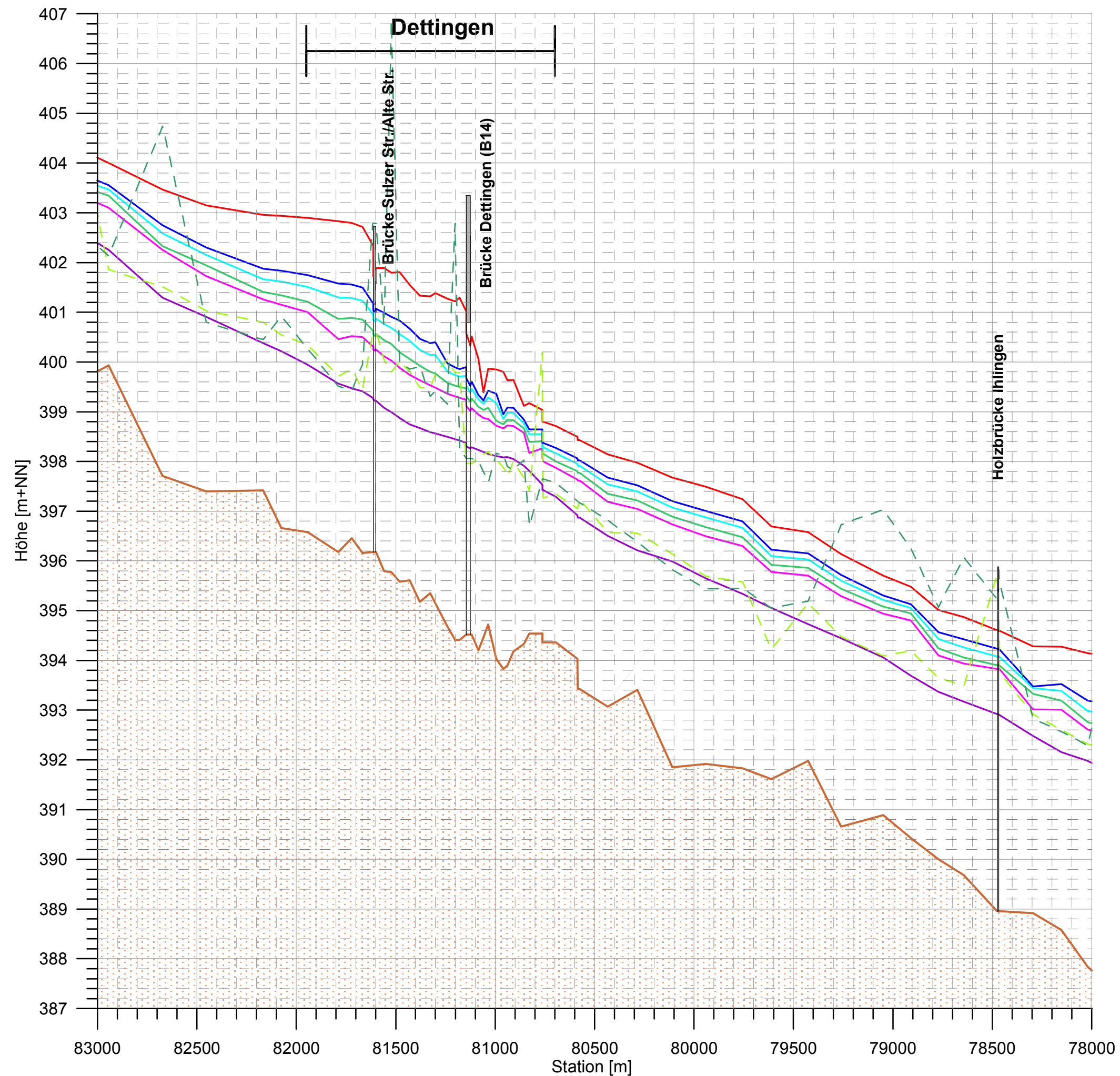
Diplomarbeit Katinka Braun
Bauhaus-Universität Weimar



**Hochwassergefahrenkarte
TBG 402, Neckar**

**Wasserspiegellängsschnitt
02345_02 Neckar
Ist-Zustand**

Maßstab:	Höhe 1 : 80 Länge 1 : 20 000		Datum	Name
		bearbeitet:	18.09.2008	K. Braun
		geprüft:		
Projekt-Nr.:				
Zeichnung: LS_HQlst_02345_02.grf				



Anlage C.1.5

Legende:

- WSP HQextrem
- WSP HQ100
- WSP HQ050
- WSP_HQ020
- WSP HQ010
- WSP HQ002
- OK Mittelwasserbett links
- OK Mittelwasserbett rechts
- Sohle

Diplomarbeit Katinka Braun
Bauhaus-Universität Weimar

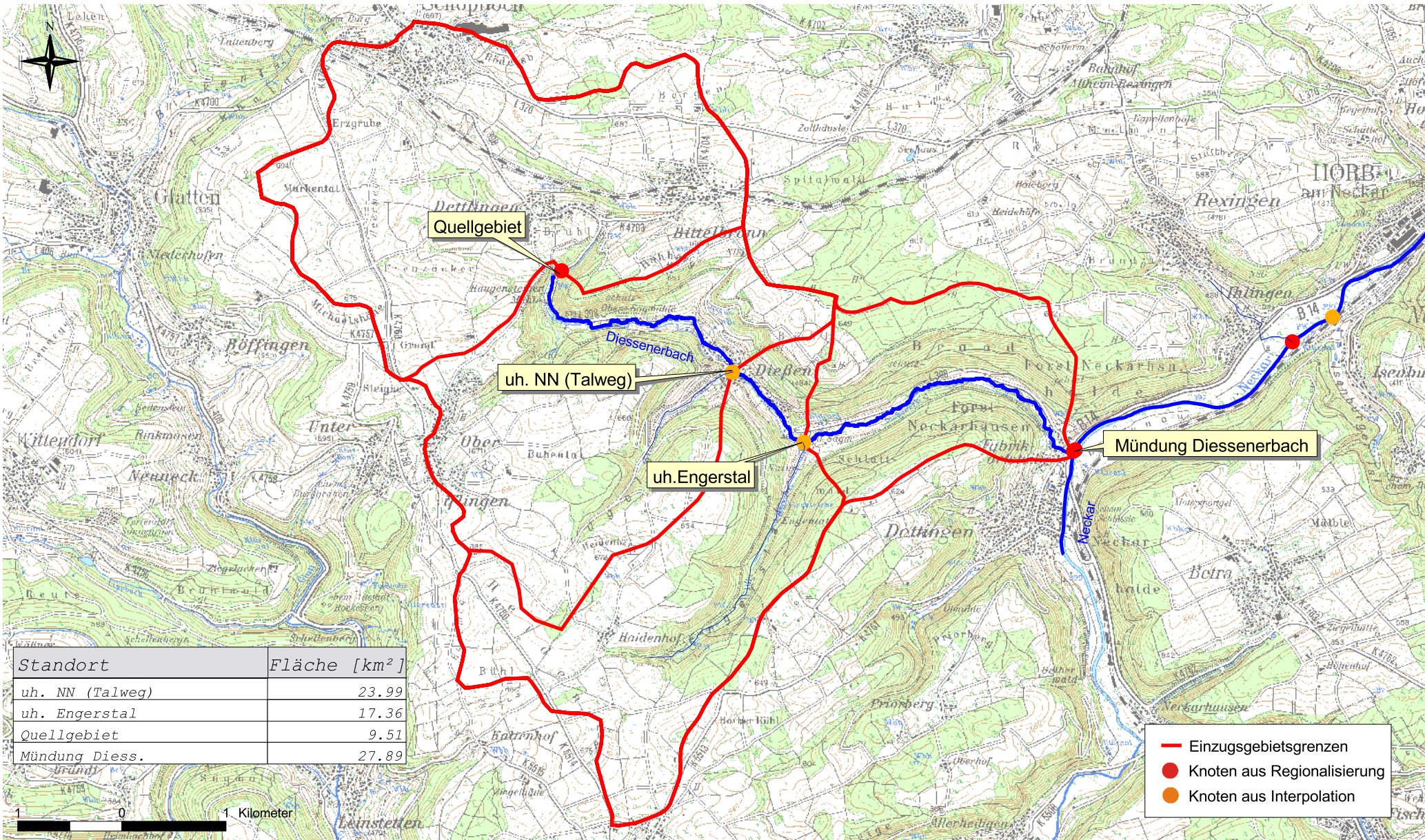


**Hochwassergefahrenkarte
TBG 402, Neckar**

**Wasserspiegellängsschnitt
02345_03 Neckar
Ist-Zustand**

Maßstab:	Höhe 1 : 80 Länge 1 : 20 000		Datum	Name
		bearbeitet:	18.09.2008	K. Braun
		geprüft:		
Projekt-Nr.:				
Zeichnung: LS_HQlst_02345_03.grf				

Anlage C.2.1 Diessenerbach: Einzugsgebiete

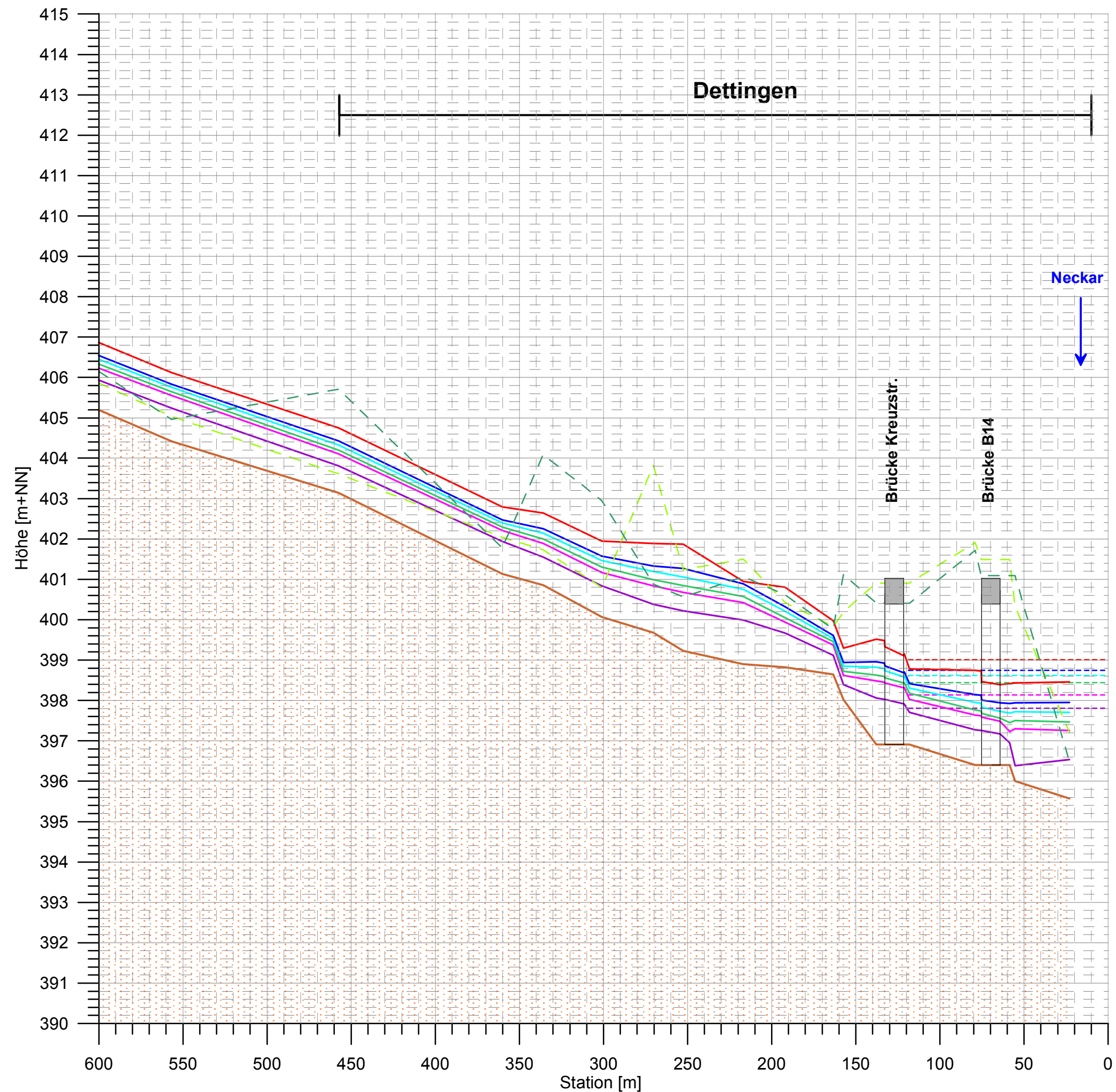


Anlage C.2.2 Diessenerbach: Interpolation der HQ-Abflüsse

Gewässer: Diessenerbach			
Knoten_{ges}:	Quellgebiet	A_{ges} [km²]:	17.40
Knoten_{Oberlauf}:	Mündung	A_{oberlauf} [km²]:	9.51
Knoten_{Unterlauf}:	uh. NN (Talweg)	A_{unterlauf} [km²]:	27.90
	Knoten_{Oberlauf}	Knoten_{Unterlauf}	Knoten_{gesucht}*
HQ₂ [m³/s]	2.32	5.32	3.61
HQ₁₀ [m³/s]	4.80	10.98	7.45
HQ₂₀ [m³/s]	5.91	13.53	9.18
HQ₅₀ [m³/s]	7.49	17.15	11.63
HQ₁₀₀ [m³/s]	8.78	20.12	13.65
HQ_{EXT} [m³/s]	15.00	33.00	22.72

Gewässer: Diessenerbach			
Knoten_{ges}:	Quellgebiet	A_{ges} [km²]:	24.00
Knoten_{Oberlauf}:	Mündung	A_{oberlauf} [km²]:	9.51
Knoten_{Unterlauf}:	uh. Engerstal	A_{unterlauf} [km²]:	27.90
	Knoten_{Oberlauf}	Knoten_{Unterlauf}	Knoten_{gesucht}*
HQ₂ [m³/s]	2.32	5.32	4.68
HQ₁₀ [m³/s]	4.80	10.98	9.67
HQ₂₀ [m³/s]	5.91	13.53	11.91
HQ₅₀ [m³/s]	7.49	17.15	15.10
HQ₁₀₀ [m³/s]	8.78	20.12	17.72
HQ_{EXT} [m³/s]	15.00	33.00	29.18

* Berechnung nach Gl.5.4



Anlage C.2.3

Legende:

- WSP HQextrem
- WSP HQ100
- WSP HQ050
- WSP_HQ020
- WSP HQ010
- WSP HQ002
- WSP Rückstau Neckar (HQ002)
- WSP Rückstau Neckar (HQ010)
- WSP Rückstau Neckar (HQ020)
- WSP Rückstau Neckar (HQ050)
- WSP Rückstau Neckar (HQ100)
- WSP Rückstau Neckar (HQextrem)
- OK Mittelwasserbett links
- OK Mittelwasserbett rechts
- Sohle

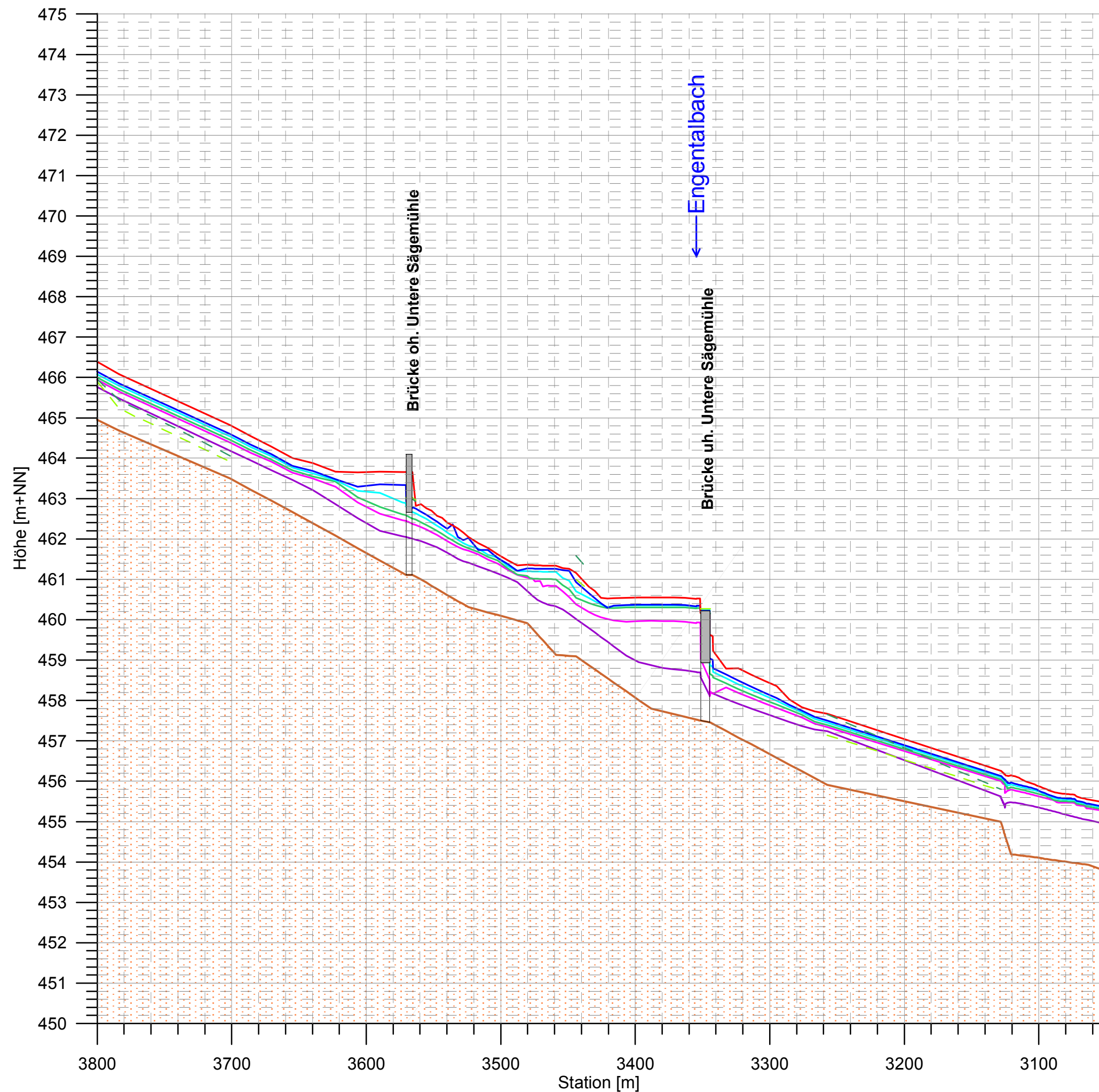
Diplomarbeit Katinka Braun
Bauhaus-Universität Weimar

Bauhaus-
Universität
Weimar

**Hochwassergefahrenkarte
TBG 402, Neckar**

**Wasserspiegellängsschnitt
02086_01 Diessenerbach
Ist-Zustand**

Maßstab:	Höhe 1 : 100 Länge 1 : 2400		Datum	Name
		bearbeitet:	16.09.2008	K. Braun
		geprüft:		
Projekt-Nr.:				
Zeichnung: LS_HQlst_02086_01.grf				



Anlage C.2.4

Legende:

- WSP HQextrem
- WSP HQ100
- WSP HQ050
- WSP HQ020
- WSP HQ010
- WSP HQ002
- OK Mittelwasserbett links
- OK Mittelwasserbett rechts
- Sohle

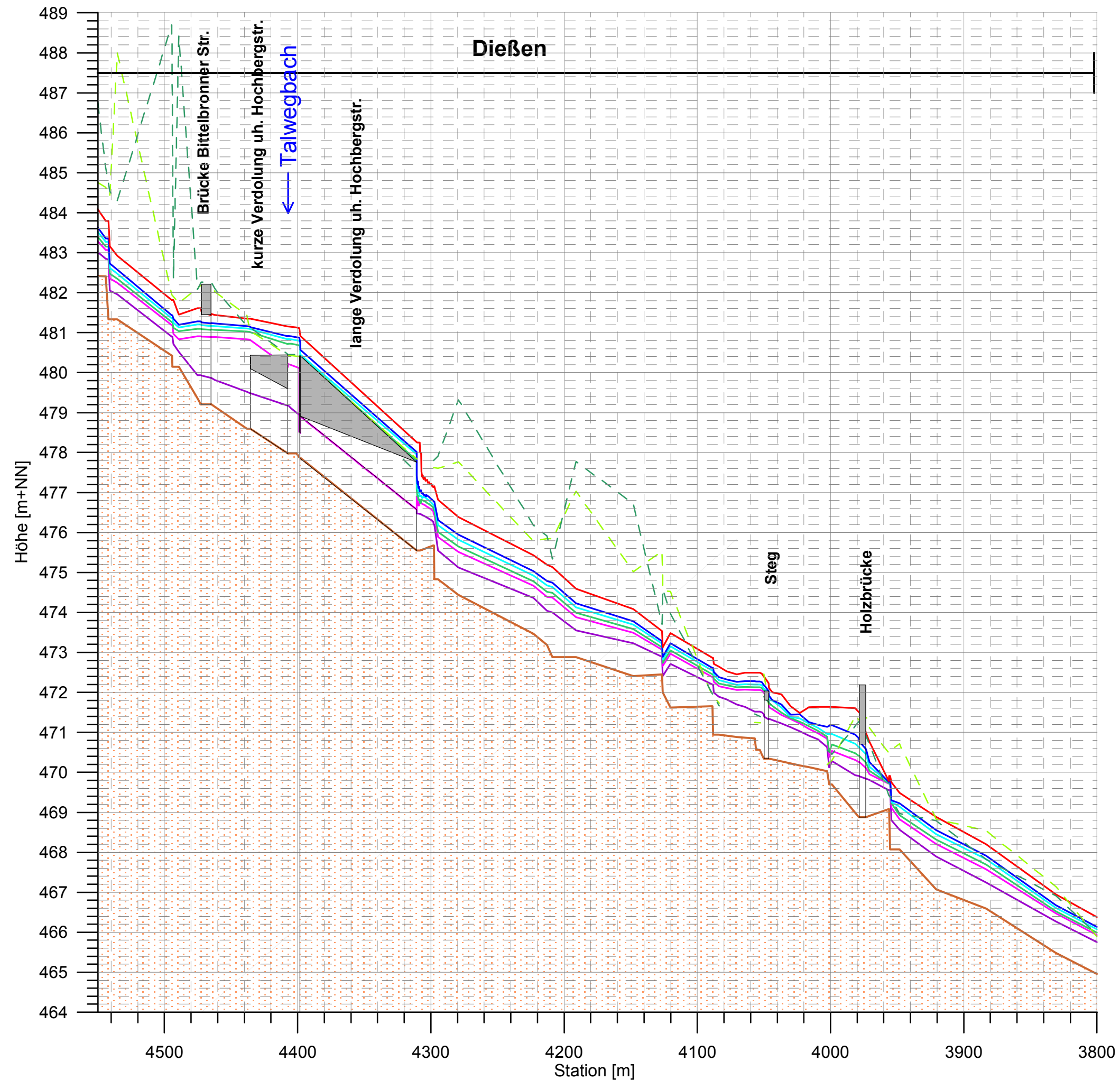
Diplomarbeit Katinka Braun
Bauhaus-Universität Weimar



**Hochwassergefahrenkarte
TBG 402, Neckar**

**Wasserspiegellängsschnitt
02086_02 Diessenerbach
Ist-Zustand**

Maßstab:	Höhe 1 : 100 Länge 1 : 3000		Datum	Name
		bearbeitet:	16.09.2008	K. Braun
		geprüft:		
Projekt-Nr.:				
Zeichnung: LS_HQIst_02086_02.grf				



Anlage C.2.5

Legende:

- WSP HQextrem
- WSP HQ100
- WSP HQ050
- WSP HQ020
- WSP HQ010
- WSP HQ002
- OK Mittelwasserbett links
- OK Mittelwasserbett rechts
- Sohle

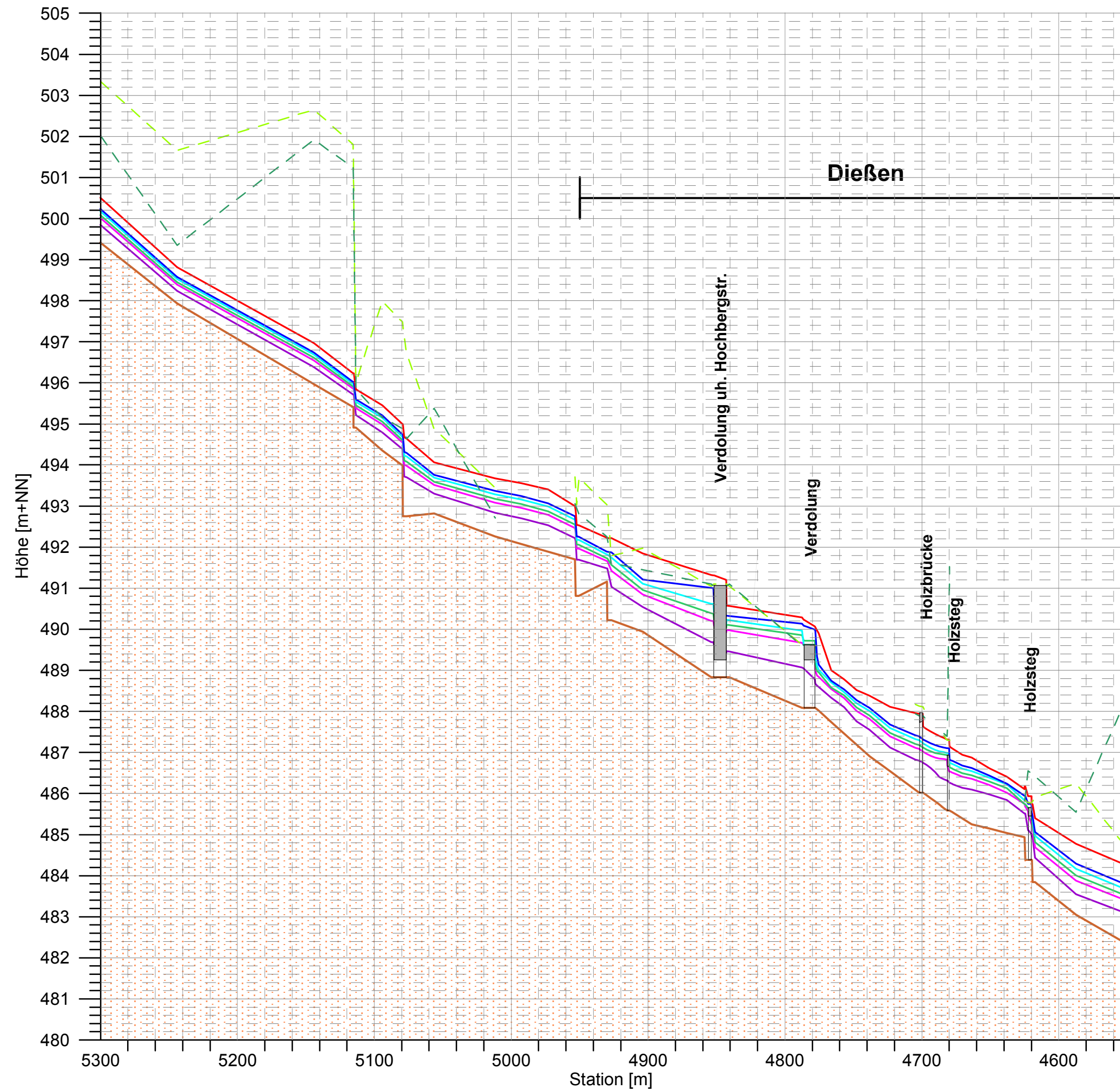
Diplomarbeit Katinka Braun
Bauhaus-Universität Weimar

Bauhaus-
Universität
Weimar

Hochwassergefahrenkarte
TBG 402, Neckar

Wasserspiegellängsschnitt
02086_03 Diessenerbach
Ist-Zustand

Maßstab:	Höhe 1 : 100 Länge 1 : 3000		Datum	Name
		bearbeitet:	16.09.2008	K. Braun
		geprüft:		
Projekt-Nr.:				
Zeichnung: LS_HQIst_02086_03.grf				



Anlage C.2.6

Legende:

- WSP HQextrem
- WSP HQ100
- WSP HQ050
- WSP HQ020
- WSP HQ010
- WSP HQ002
- OK Mittelwasserbett links
- OK Mittelwasserbett rechts
- Sohle

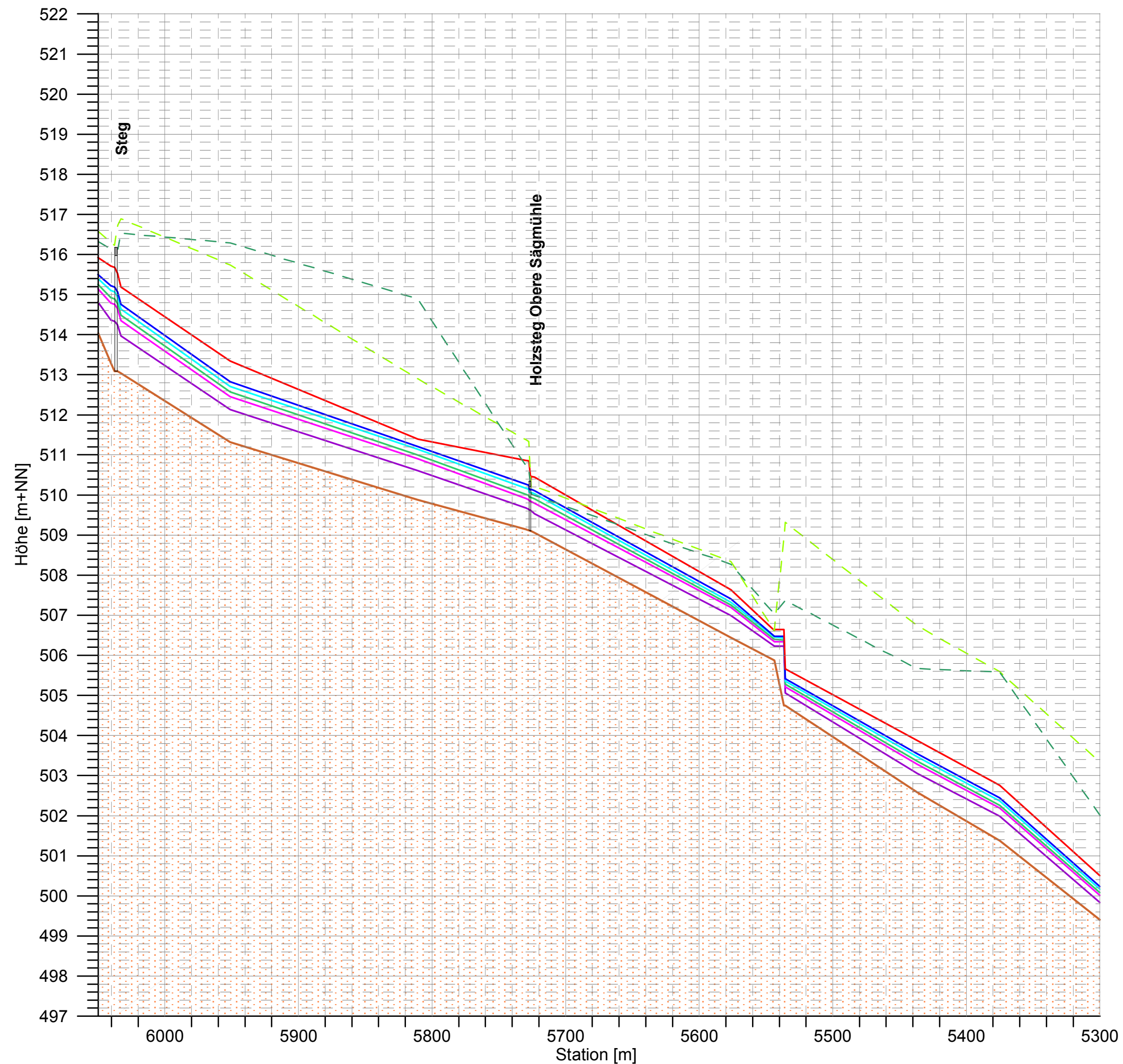
Diplomarbeit Katinka Braun
Bauhaus-Universität Weimar



**Hochwassergefahrenkarte
TBG 402, Neckar**

**Wasserspiegellängsschnitt
02086_02 Diessenerbach
Ist-Zustand**

Maßstab:	Höhe 1 : 100 Länge 1 : 3000		Datum	Name
		bearbeitet:	16.09.2008	K. Braun
		geprüft:		
Projekt-Nr.:				
Zeichnung: LS_HQIst_02086_04.grf				



Anlage C.2.7

Legende:

- WSP HQextrem
- WSP HQ100
- WSP HQ050
- WSP HQ020
- WSP HQ010
- WSP HQ002
- OK Mittelwasserbett links
- OK Mittelwasserbett rechts
- Sohle

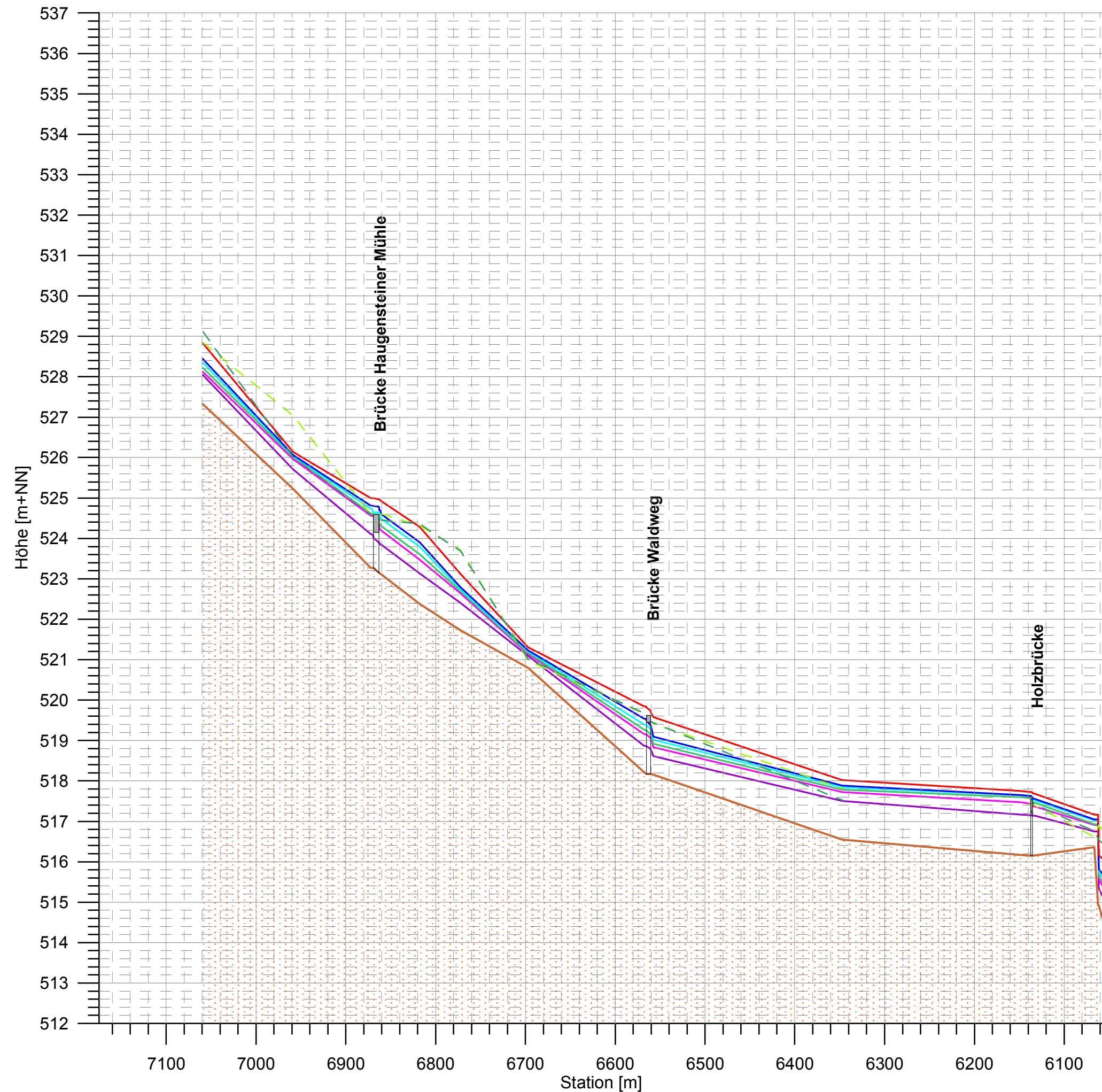
Diplomarbeit Katinka Braun
Bauhaus-Universität Weimar



**Hochwassergefahrenkarte
TBG 402, Neckar**

**Wasserspiegellängsschnitt
02086_05 Diessenerbach
Ist-Zustand**

Maßstab:	Höhe 1 : 100 Länge 1 : 3000		Datum	Name
		bearbeitet:	16.09.2008	K. Braun
		geprüft:		
Projekt-Nr.:				
Zeichnung: LS_HQlst_02086_02.grf				



Anlage C.2.8

Legende:

- WSP HQextrem
- WSP HQ100
- WSP HQ050
- WSP HQ020
- WSP HQ010
- WSP HQ002
- OK Mittelwasserbett links
- OK Mittelwasserbett rechts
- Sohle

Diplomarbeit Katinka Braun
Bauhaus-Universität Weimar

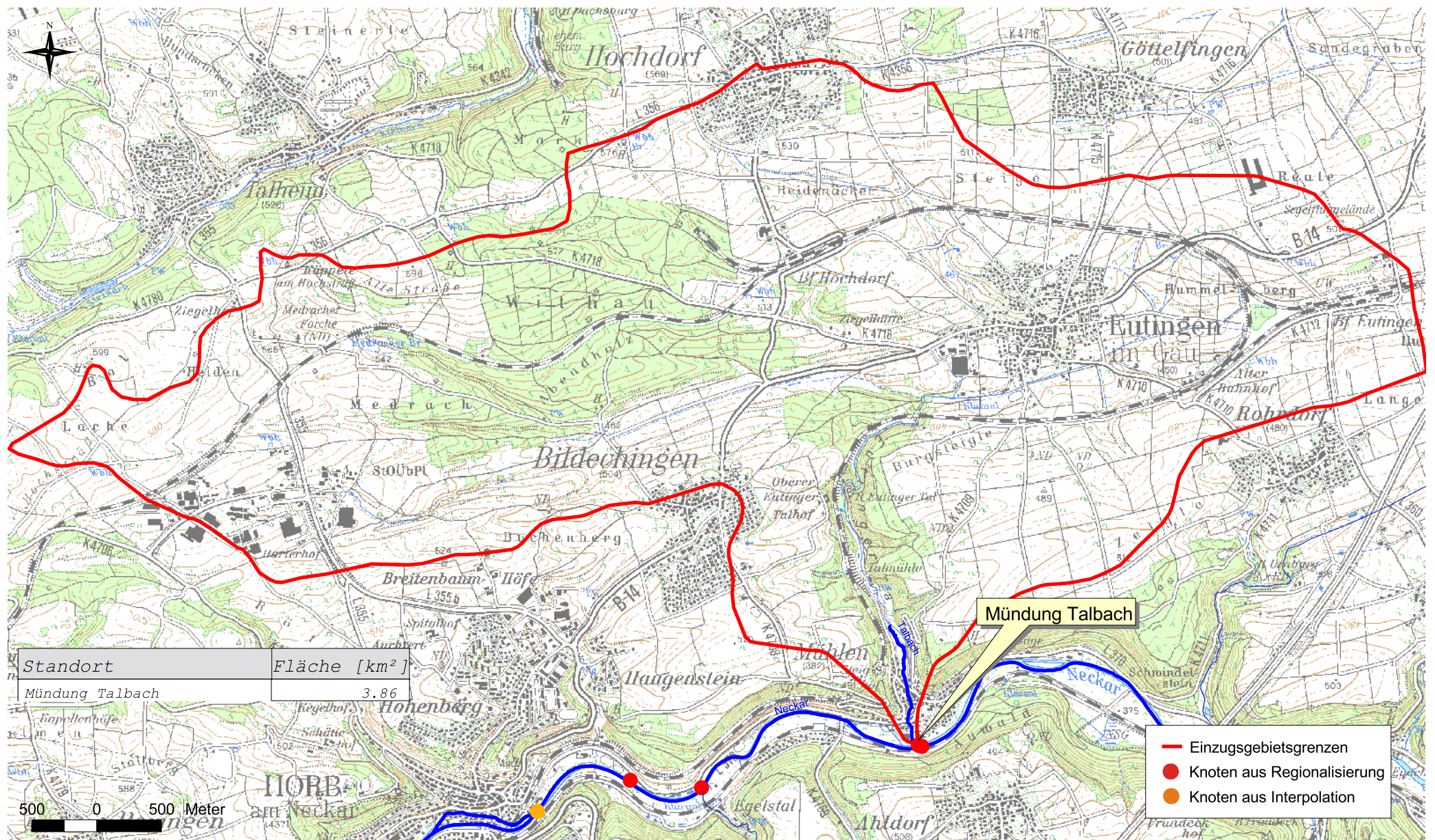
Bauhaus-
Universität
Weimar

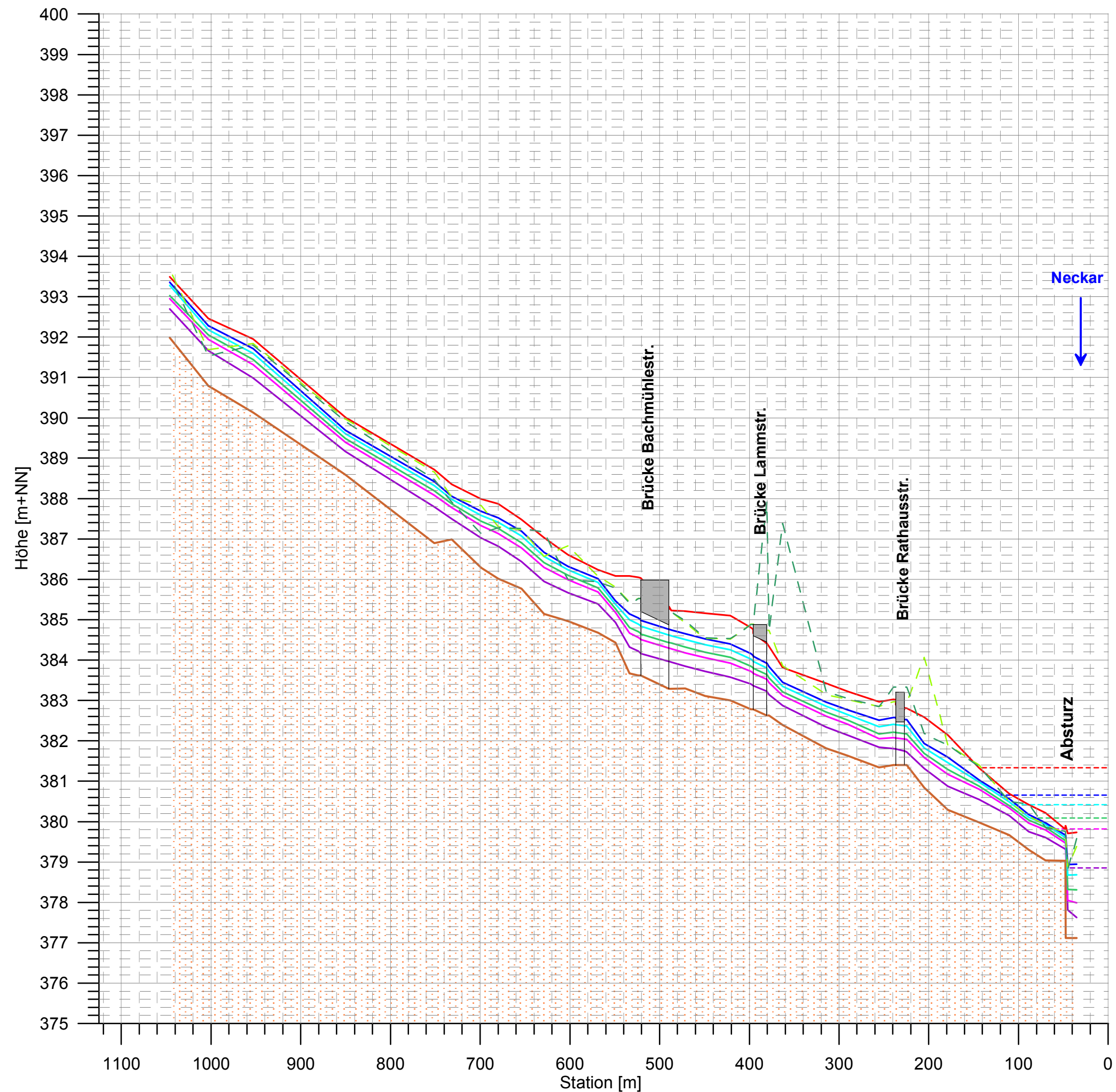
**Hochwassergefahrenkarte
TBG 402, Neckar**

**Wasserspiegellängsschnitt
02086_06 Diessenerbach
Ist-Zustand**

Maßstab:	Höhe 1 : 100 Länge 1 : 4500		Datum	Name
		bearbeitet:	16.09.2008	K. Braun
		geprüft:		
Projekt-Nr.:				
Zeichnung: LS_HQlst_02086_06.grf				

Anlage C.3.1 Talbach: Einzugsgebiet





Anlage C.3.2

Legende:

- WSP HQextrem
- WSP HQ100
- WSP HQ050
- WSP_HQ020
- WSP HQ010
- WSP HQ002
- WSP Rückstau Neckar (HQ002)
- WSP Rückstau Neckar (HQ010)
- WSP Rückstau Neckar (HQ020)
- WSP Rückstau Neckar (HQ050)
- WSP Rückstau Neckar (HQ100)
- WSP Rückstau Neckar (HQextrem)
- OK Mittelwasserbett links
- OK Mittelwasserbett rechts
- Sohle

Diplomarbeit Katinka Braun
Bauhaus-Universität Weimar



**Hochwassergefahrenkarte
TBG 402, Neckar**

**Wasserspiegellängsschnitt
02093_01 Talbach
Ist-Zustand**

Maßstab:	Höhe 1 : 100 Länge 1 : 4500		Datum	Name
		bearbeitet:	18.09.2008	K. Braun
		geprüft:		
Projekt-Nr.:				
Zeichnung: LS_HQlst_02093_01.grf				

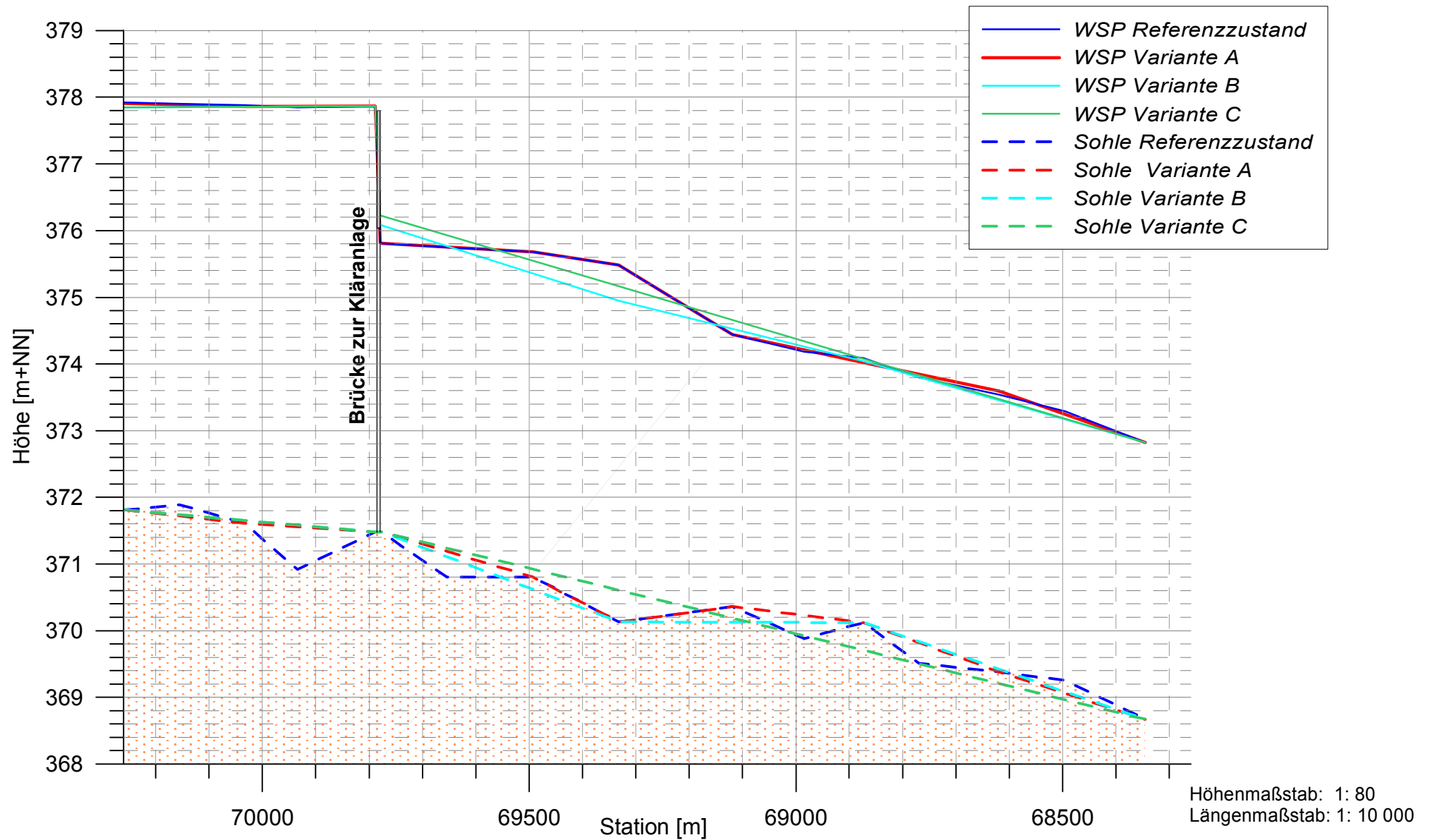
Anlage D.1.1 Neckar uh. Mühlen: Lage der Querprofile im Referenzzustand



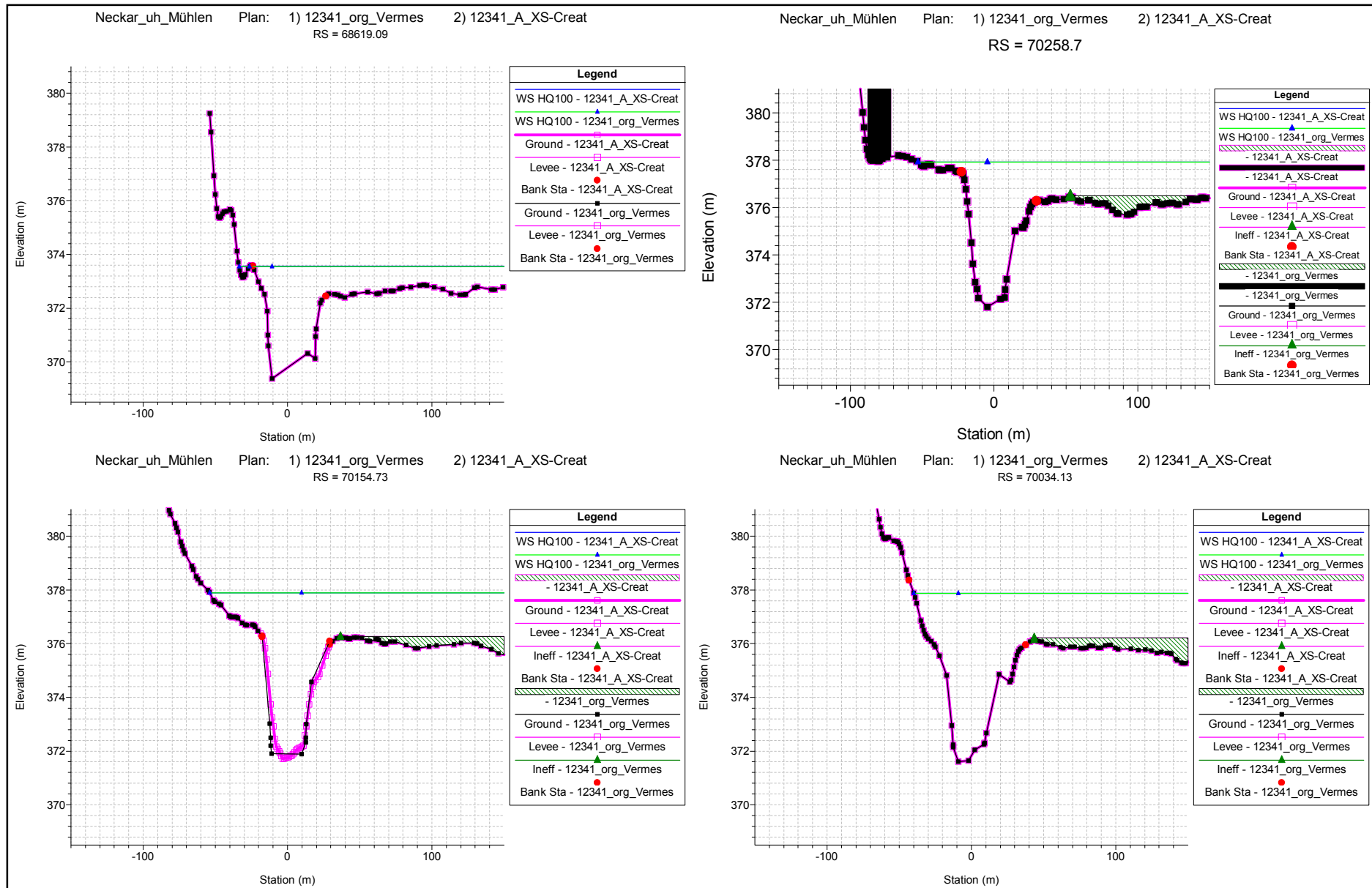
Anlage D.1.2 Neckar uh. Mühlen: Querprofile der Variante A, B, C

Referenzzustand	Variante A	Variante B	Variante C	Bemerkung
Stationierung [km]				
70+259	X	X	X	
70+155	-	-	-	
70+034	X	-	-	
69+935	-	-	-	
69+789	X	X	X	Brücke zur Kläranlage
69+786	X	X	X	
69+780	X	X	X	
69+777	X	X	X	
69+654	-	-	-	
69+492	X	-	-	
69+332	X	X	-	
69+119	X	-	-	
68+985	-	-	-	
68+873	X	X	-	
68+769	-	-	-	
68+619	X	-	-	
68+495	-	-	-	
68+346	X	X	X	
X = Profile wurden berücksichtigt - = Profile blieben unberücksichtigt				

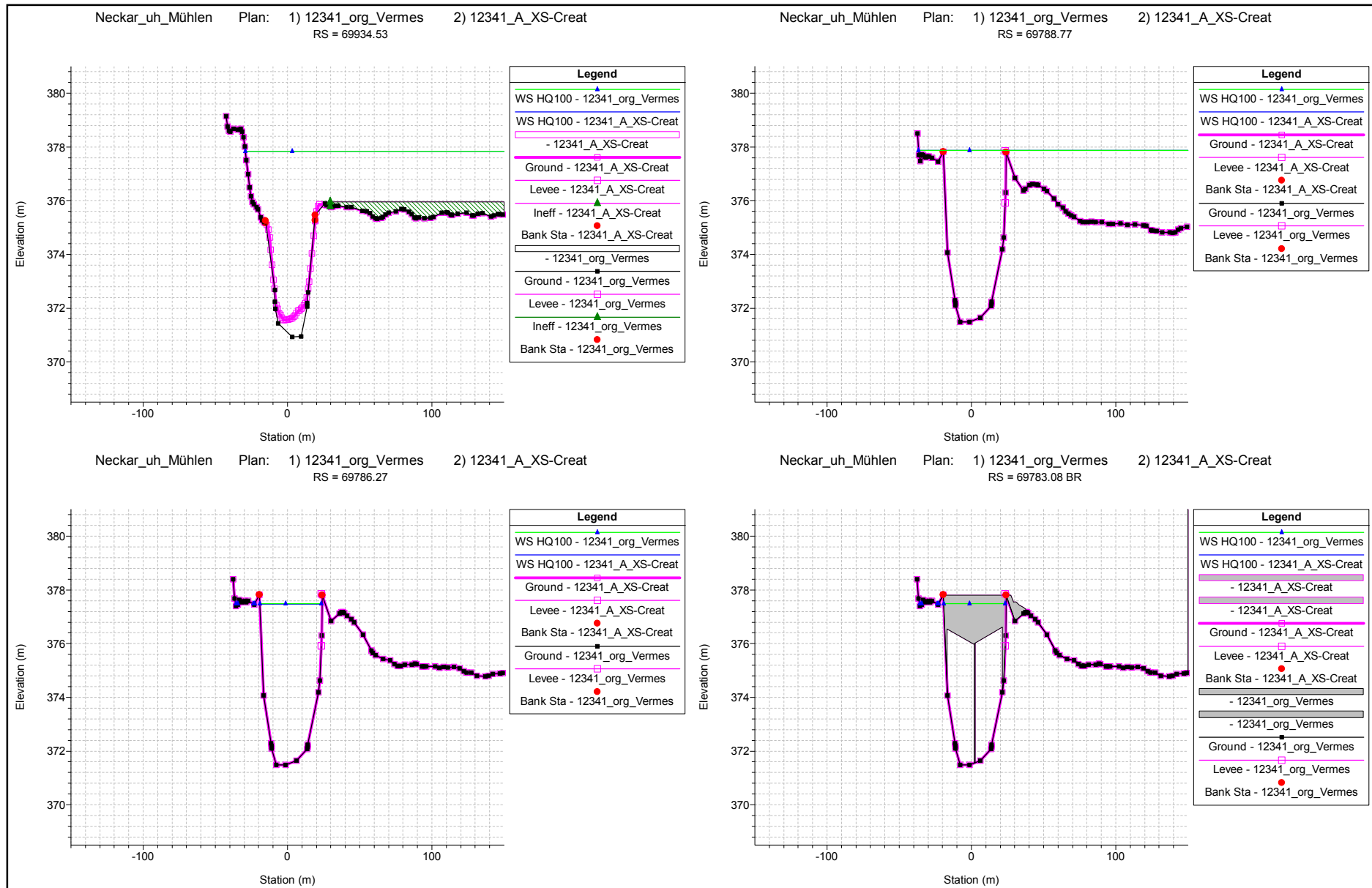
Anlage D.1.3 Neckar uh. Mühlen: Wasserspiegellängsschnitt für die Vermessungsvarianten A, B und C (ohne Zusatzprofile)



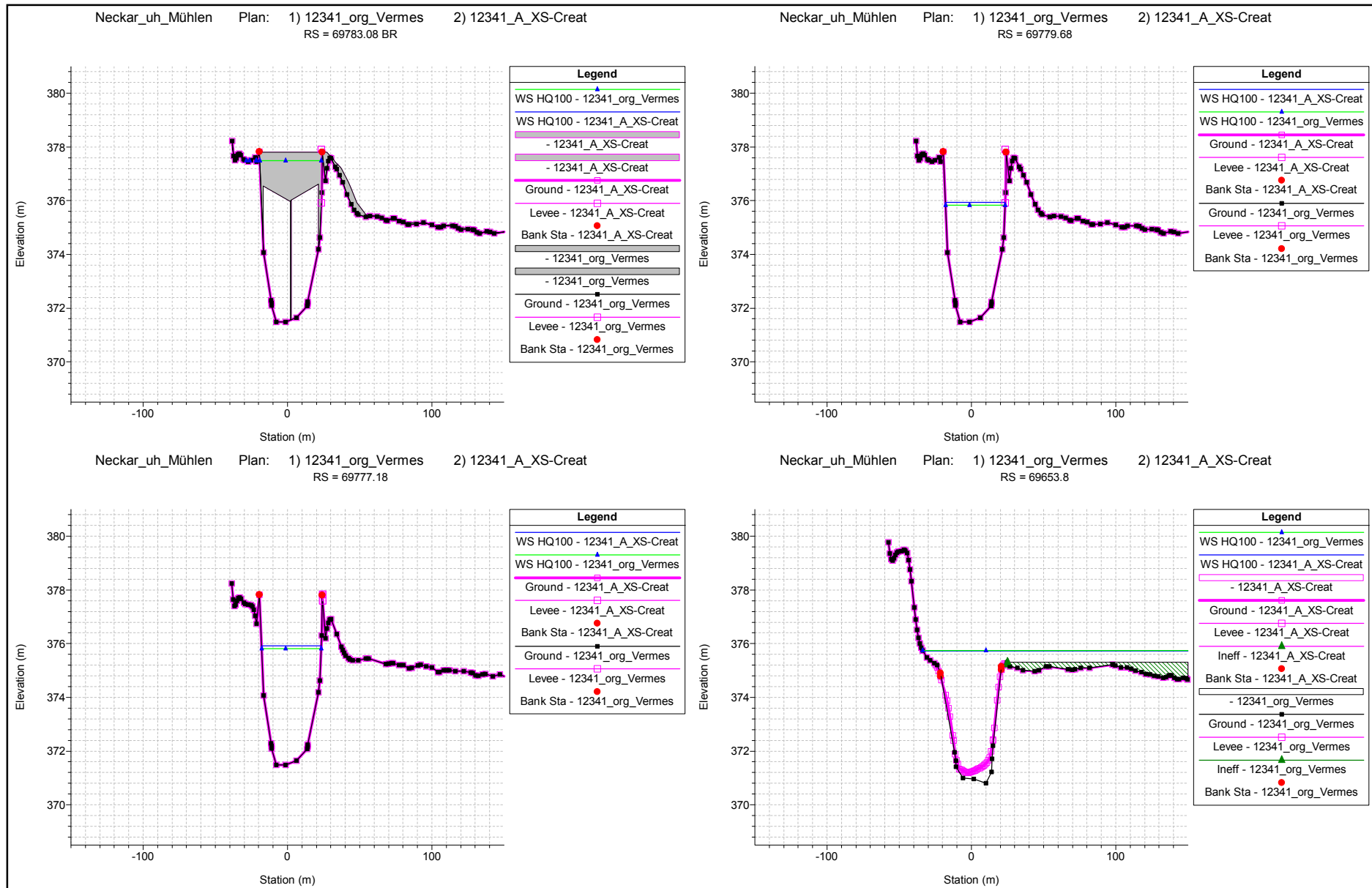
Anlage D.1.4 Neckar uh. Mühlen: Querprofilgeometrienvergleich Referenzzustand / Variante A mit Zusatzprofilen durch XS-Creator



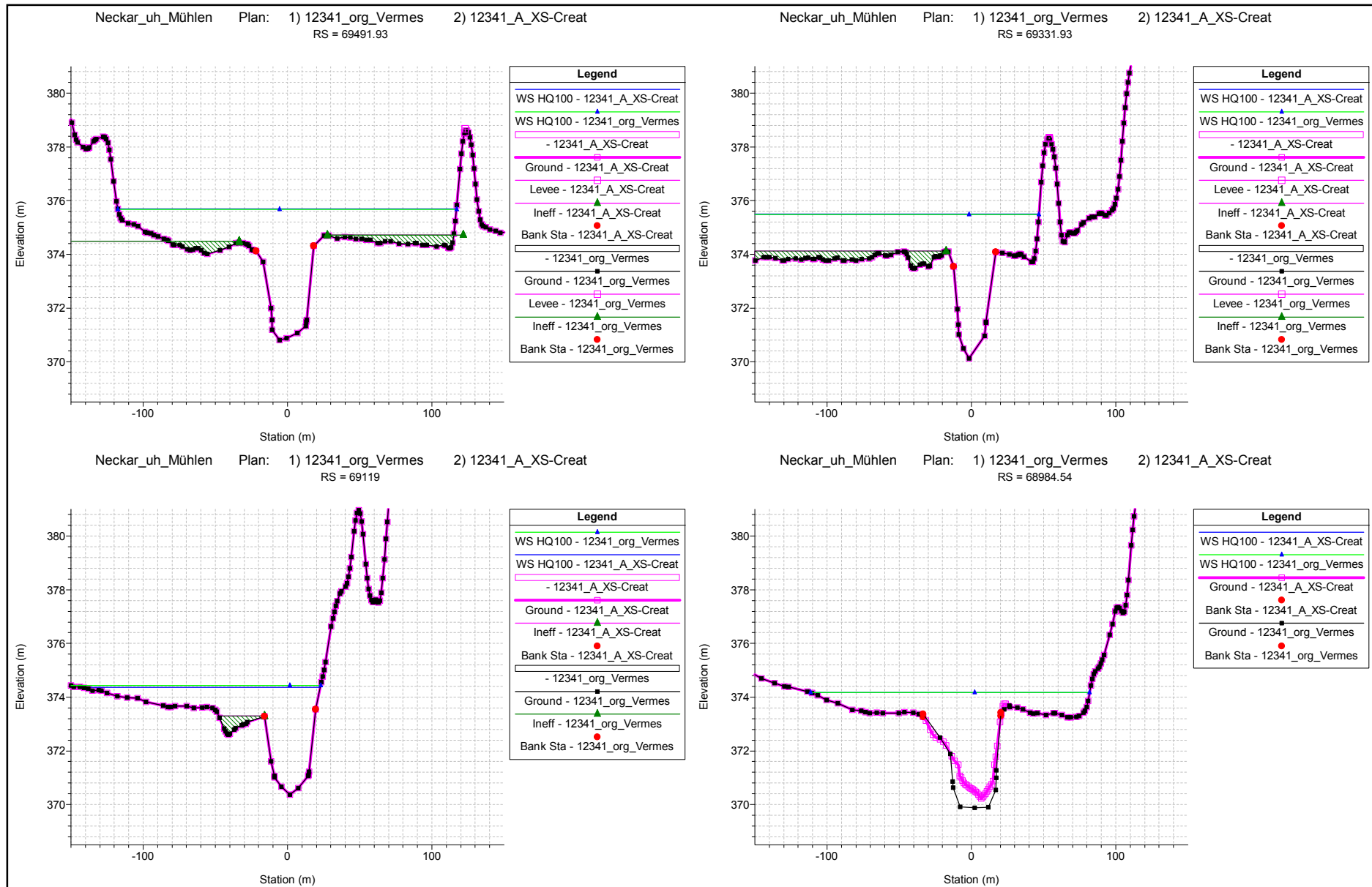
Anlage D.1.4 Neckar uh. Mühlen: Querprofilgeometrienvergleich Referenzzustand / Variante A mit Zusatzprofilen durch XS-Creator



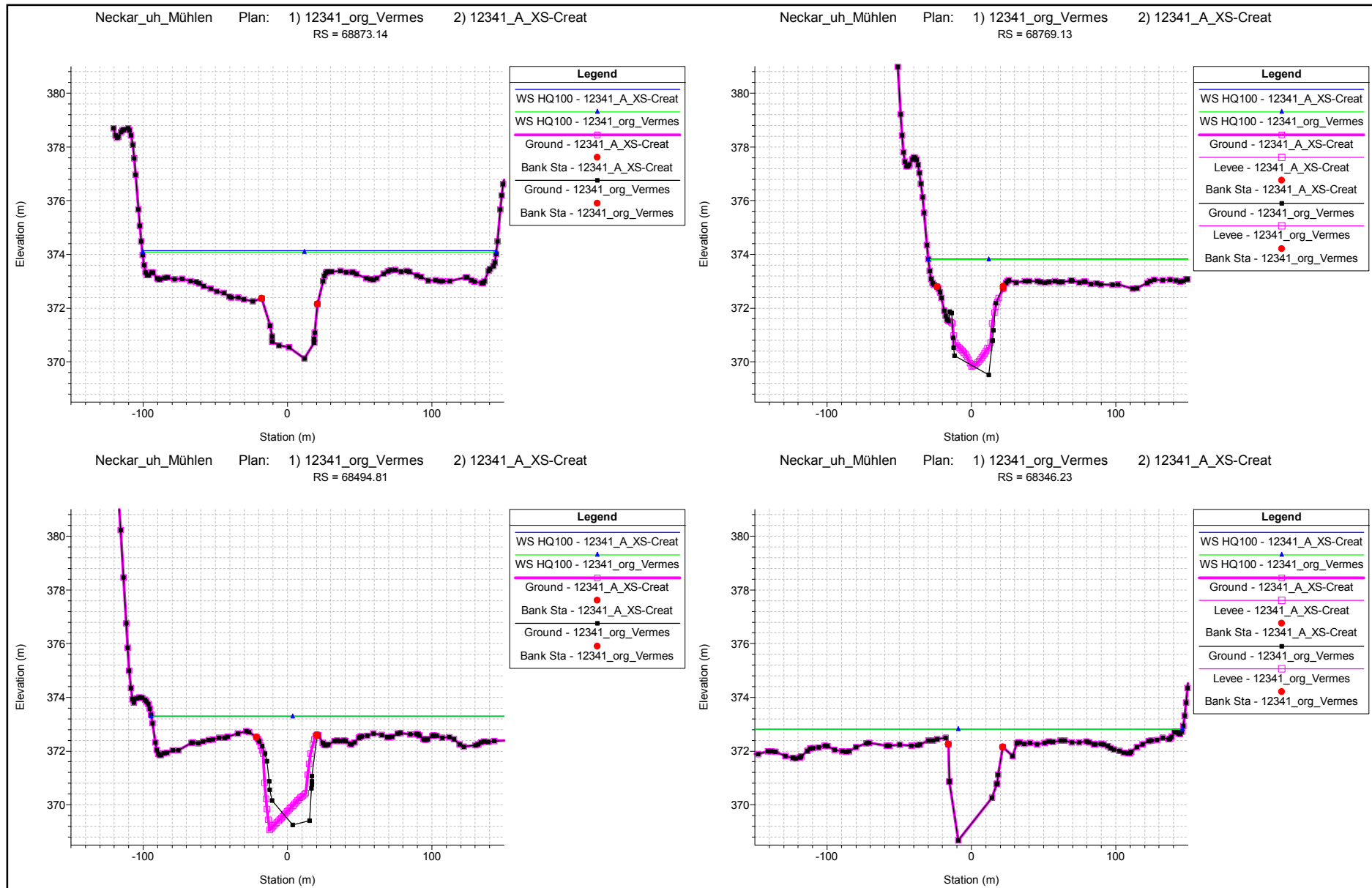
Anlage D.1.4 Neckar uh. Mühlen: Querprofilgeometrienvergleich Referenzzustand / Variante A mit Zusatzprofilen durch XS-Creator



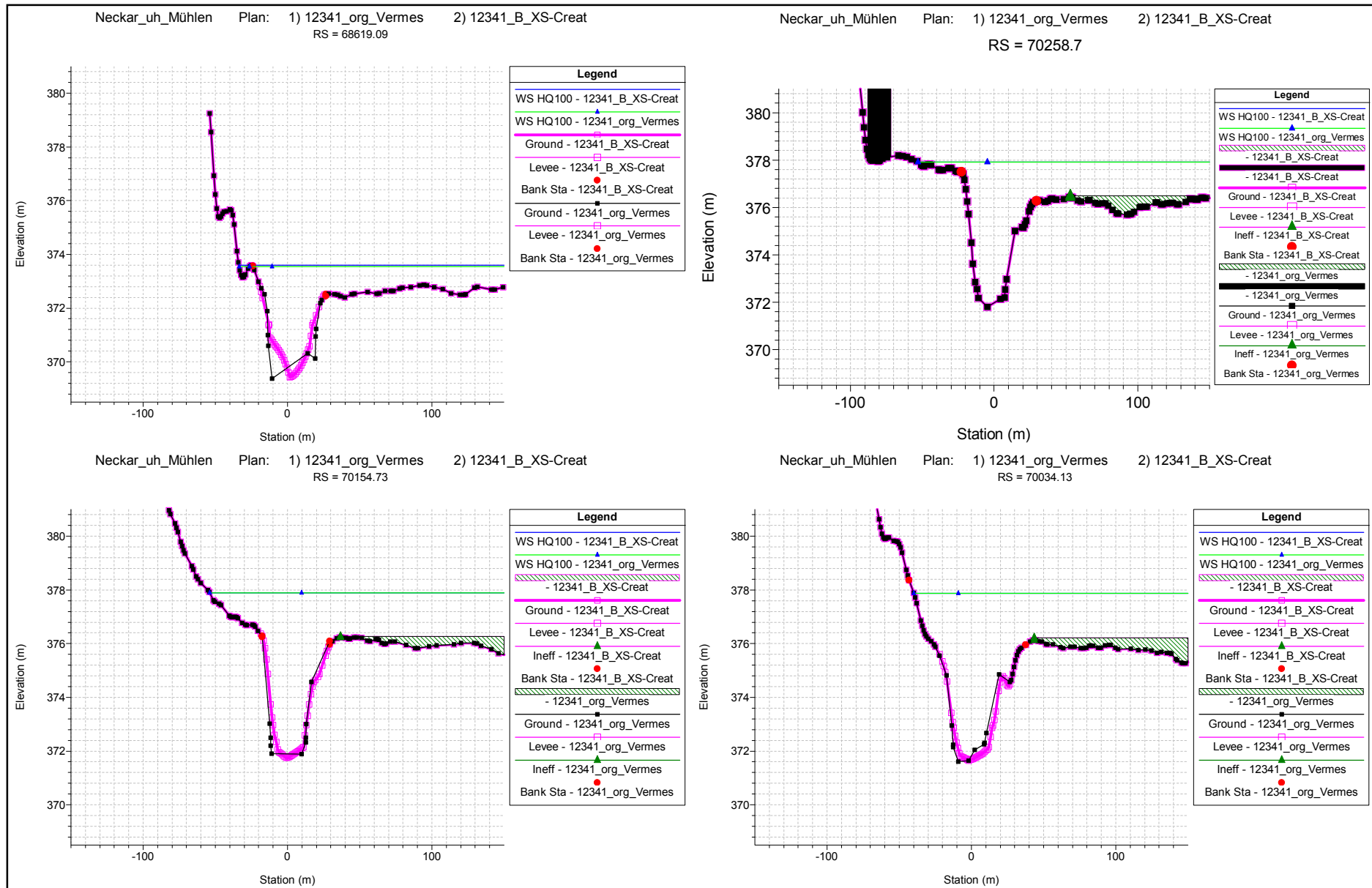
Anlage D.1.4 Neckar uh. Mühlen: Querprofilgeometrienvergleich Referenzzustand / Variante A mit Zusatzprofilen durch XS-Creator



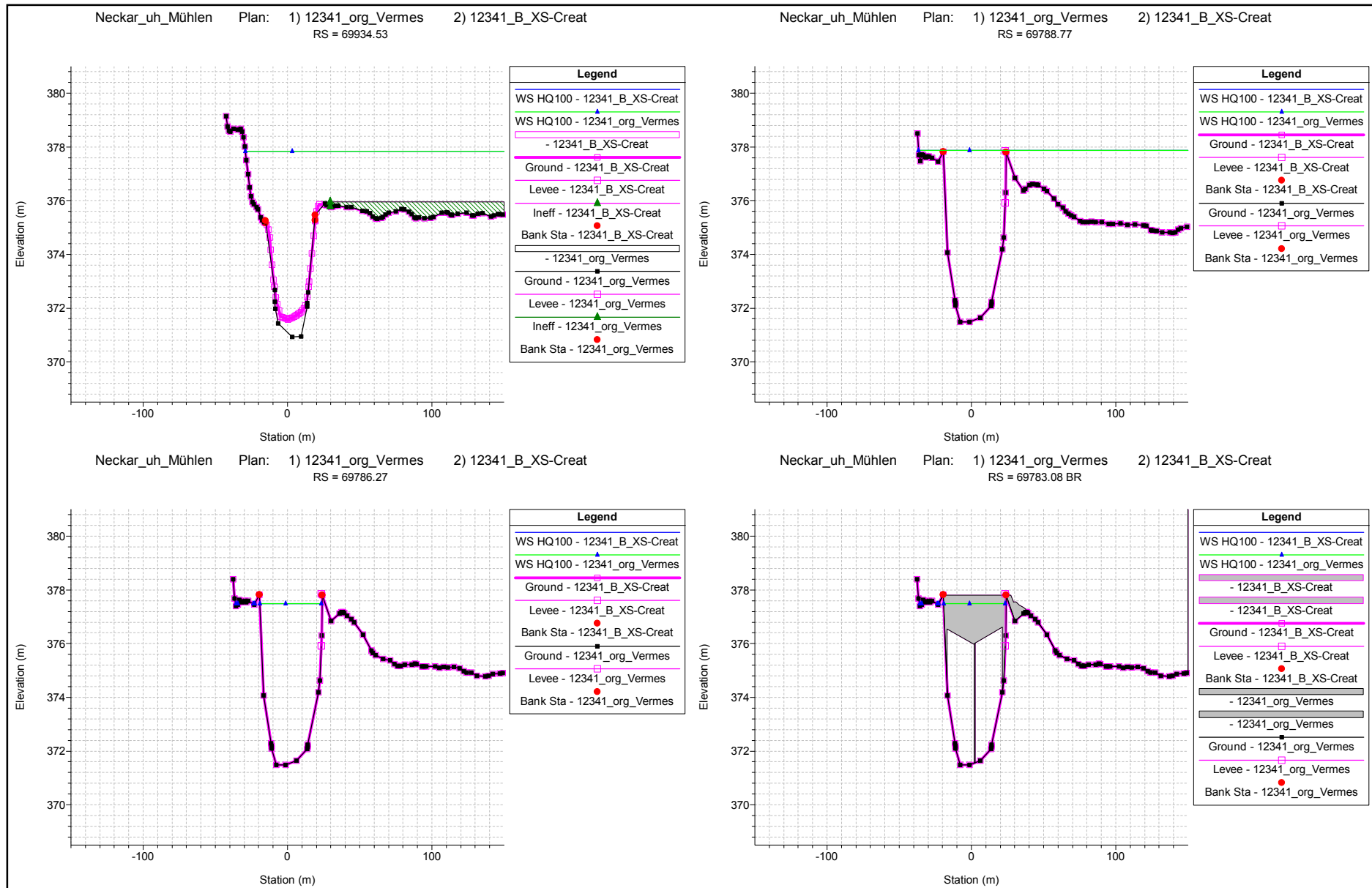
Anlage D.1.4 Neckar uh. Mühlen: Querprofilgeometrienvergleich Referenzzustand / Variante A mit Zusatzprofilen durch XS-Creator



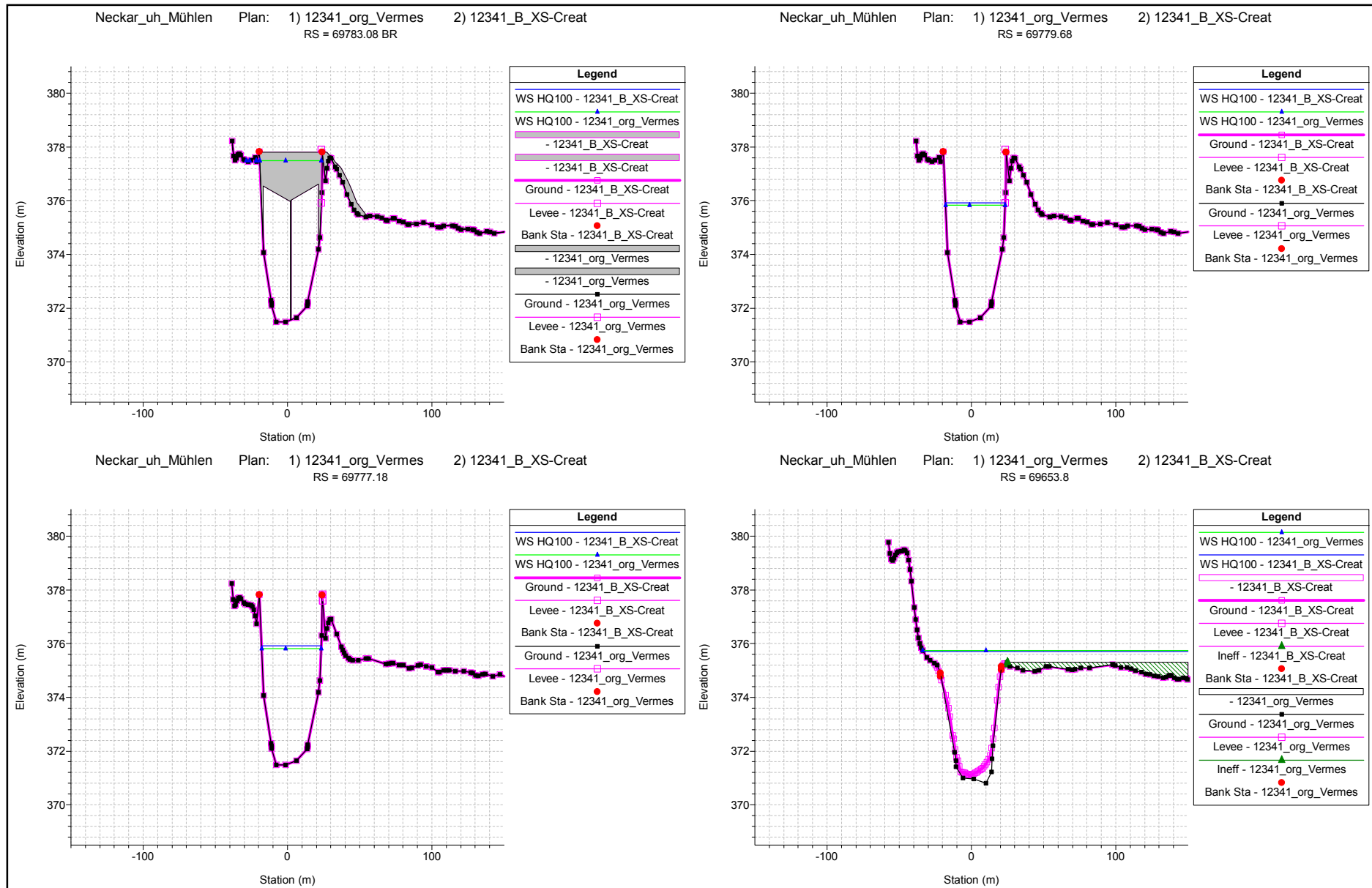
Anlage D.1.5 Neckar uh. Mühlen: Querprofilgeometrienvergleich Referenzzustand/ Variante B mit Zusatzprofilen durch XS-Creator



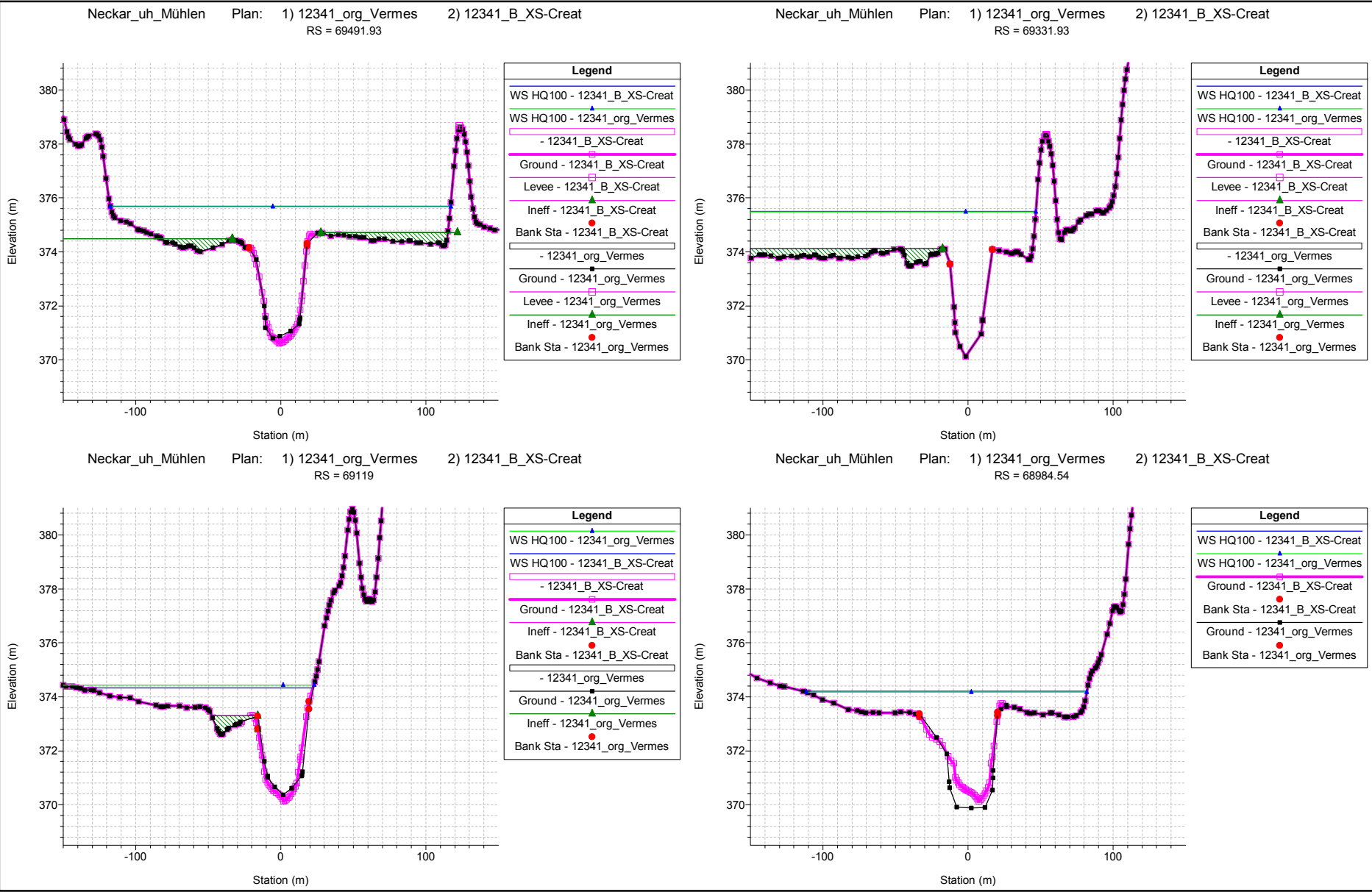
Anlage D.1.5 Neckar uh. Mühlen: Querprofilgeometrienvergleich Referenzzustand/ Variante B mit Zusatzprofilen durch XS-Creator



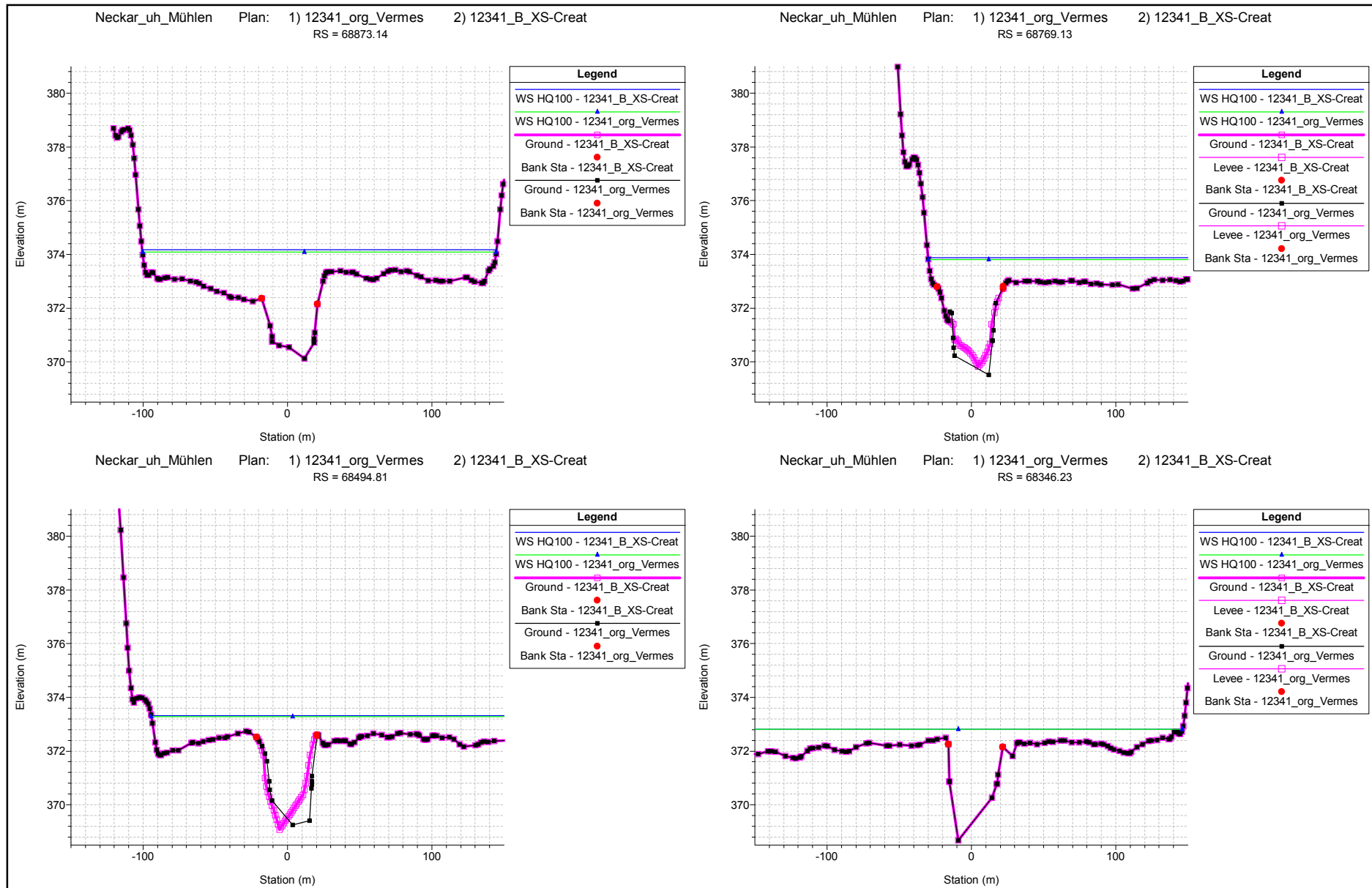
Anlage D.1.5 Neckar uh. Mühlen: Querprofilgeometrienvergleich Referenzzustand/ Variante B mit Zusatzprofilen durch XS-Creator



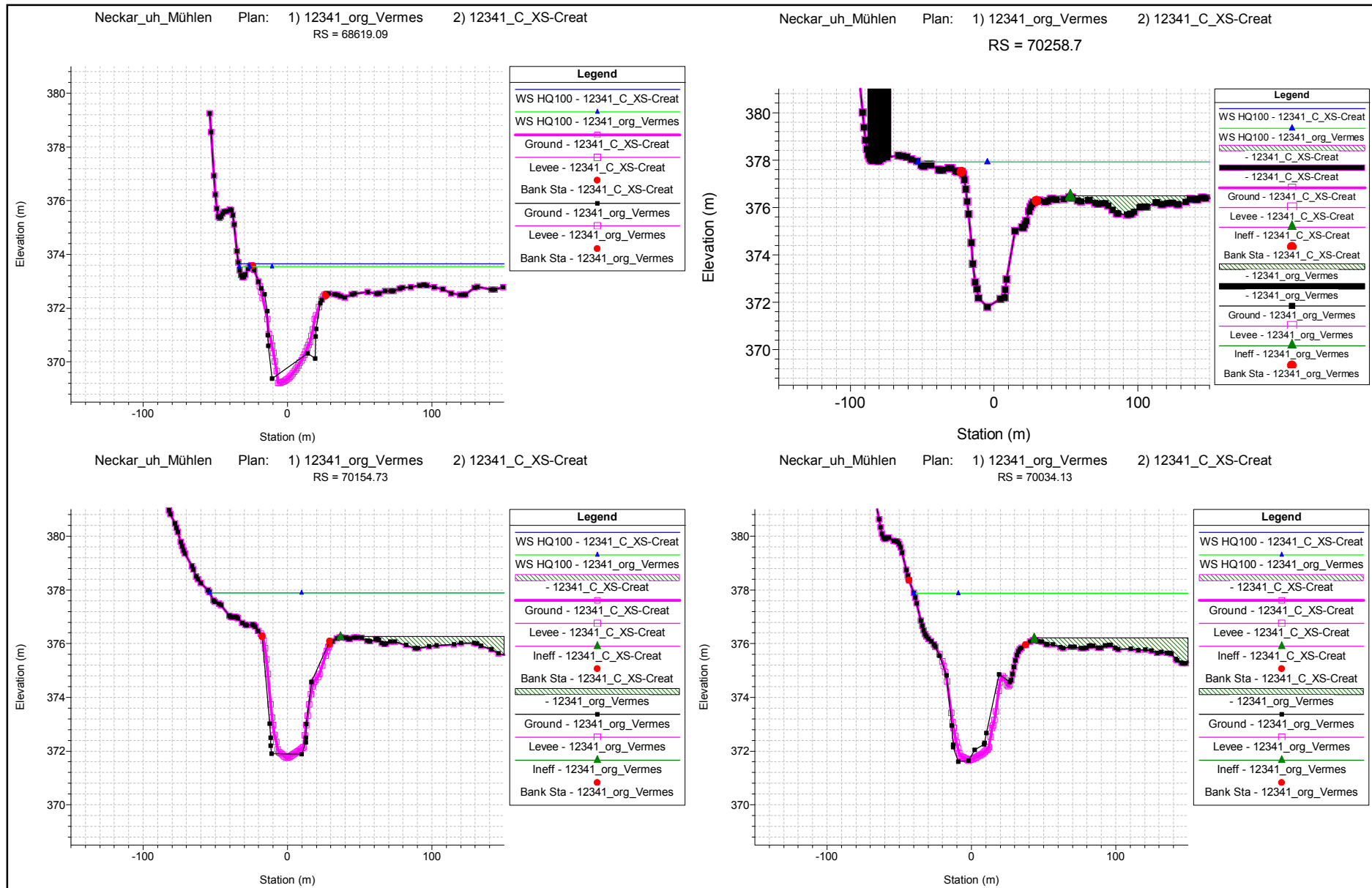
Anlage D.1.5 Neckar uh. Mühlen: Querprofilgeometrienvergleich Referenzzustand/ Variante B mit Zusatzprofilen durch XS-Creator



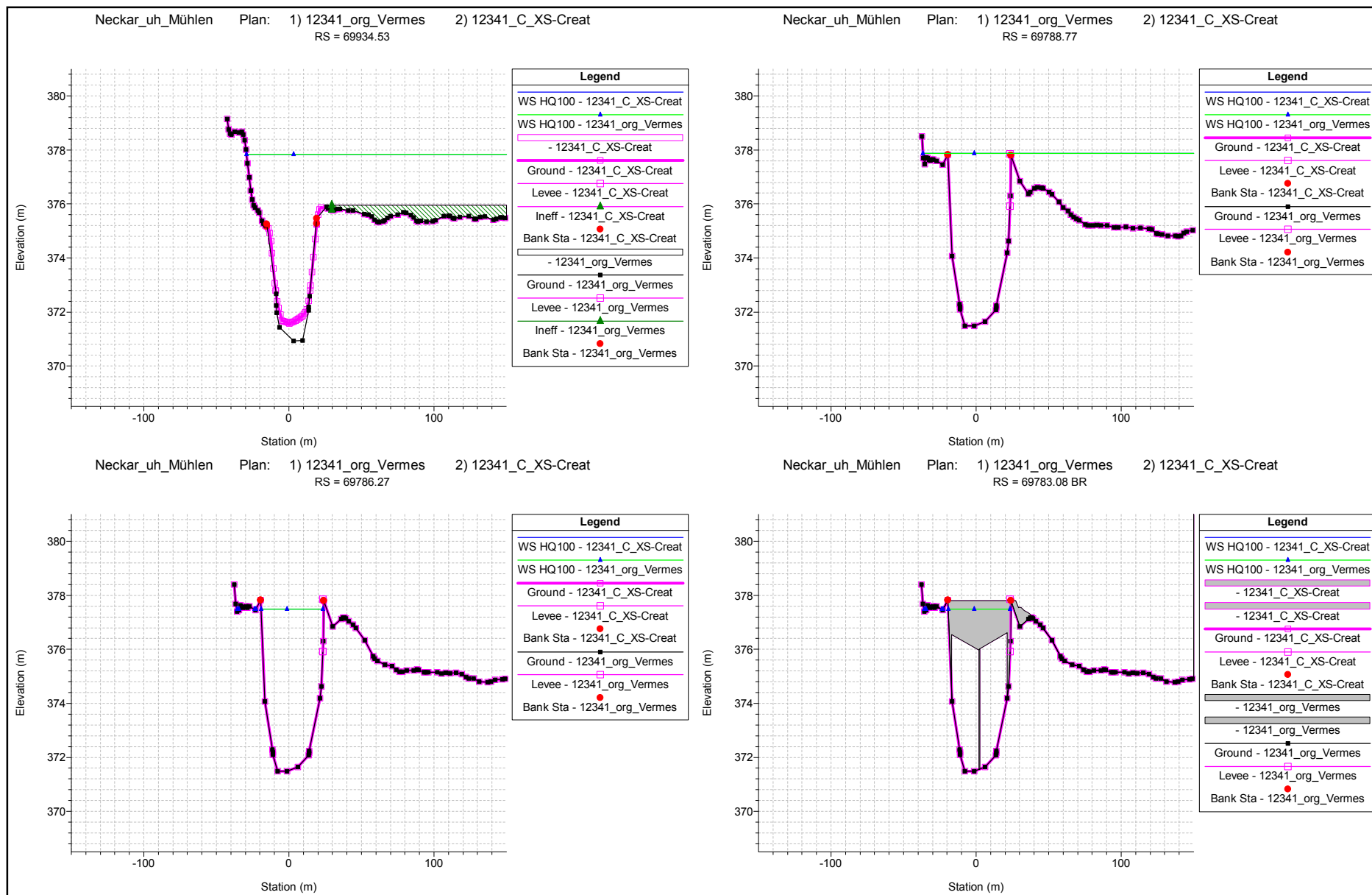
Anlage D.1.5 Neckar uh. Mühlen: Querprofilgeometrienvergleich Referenzzustand/ Variante B mit Zusatzprofilen durch XS-Creator



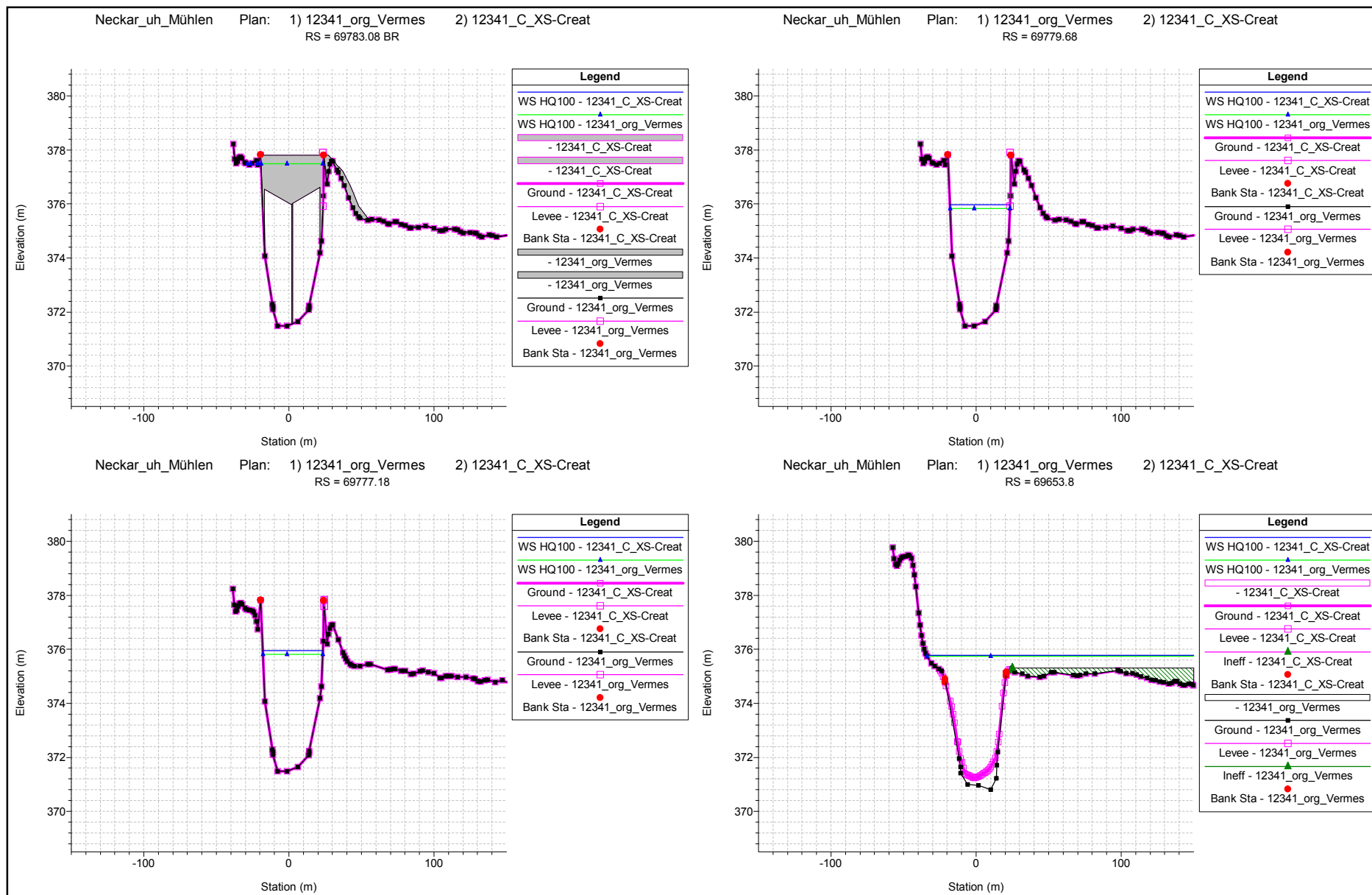
Anlage D.1.6 Neckar uh. Mühlen: Querprofilgeometrienvergleich Referenzzustand/ Variante C mit Zusatzprofilen durch XS-Creator



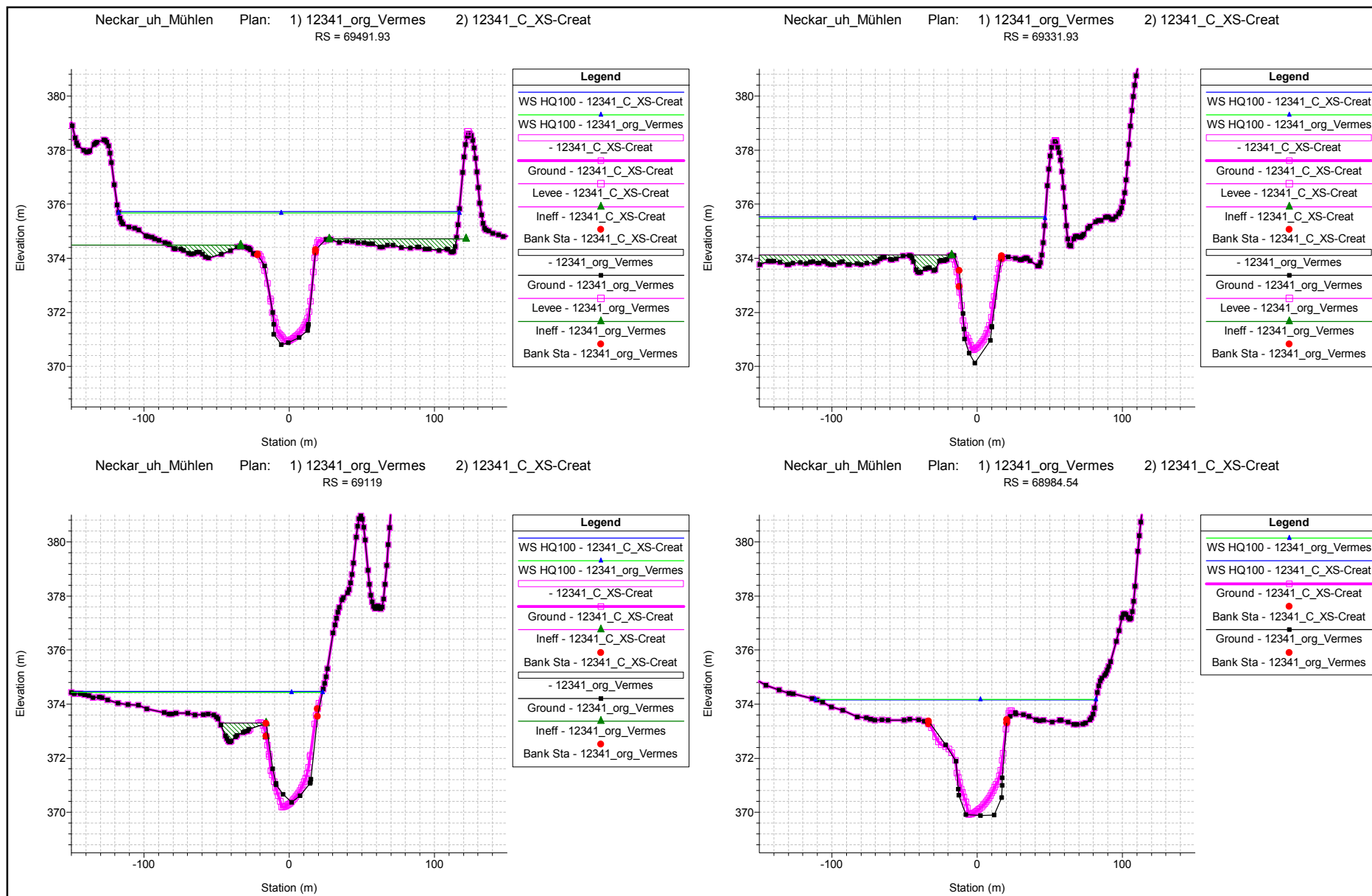
Anlage D.1.6 Neckar uh. Mühlen: Querprofilgeometrienvergleich Referenzzustand/ Variante C mit Zusatzprofilen durch XS-Creator



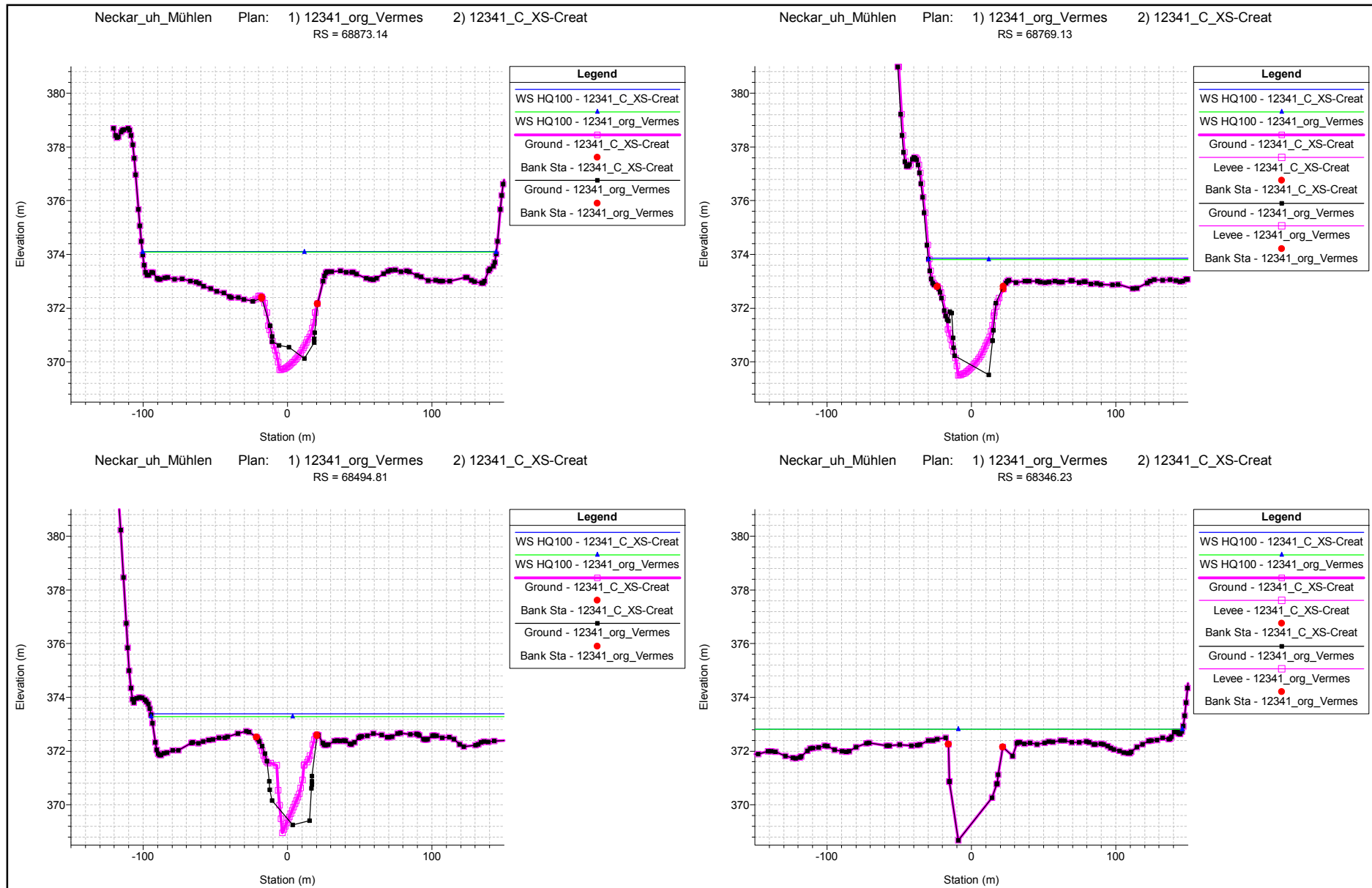
Anlage D.1.6 Neckar uh. Mühlen: Querprofilgeometrienvergleich Referenzzustand/ Variante C mit Zusatzprofilen durch XS-Creator



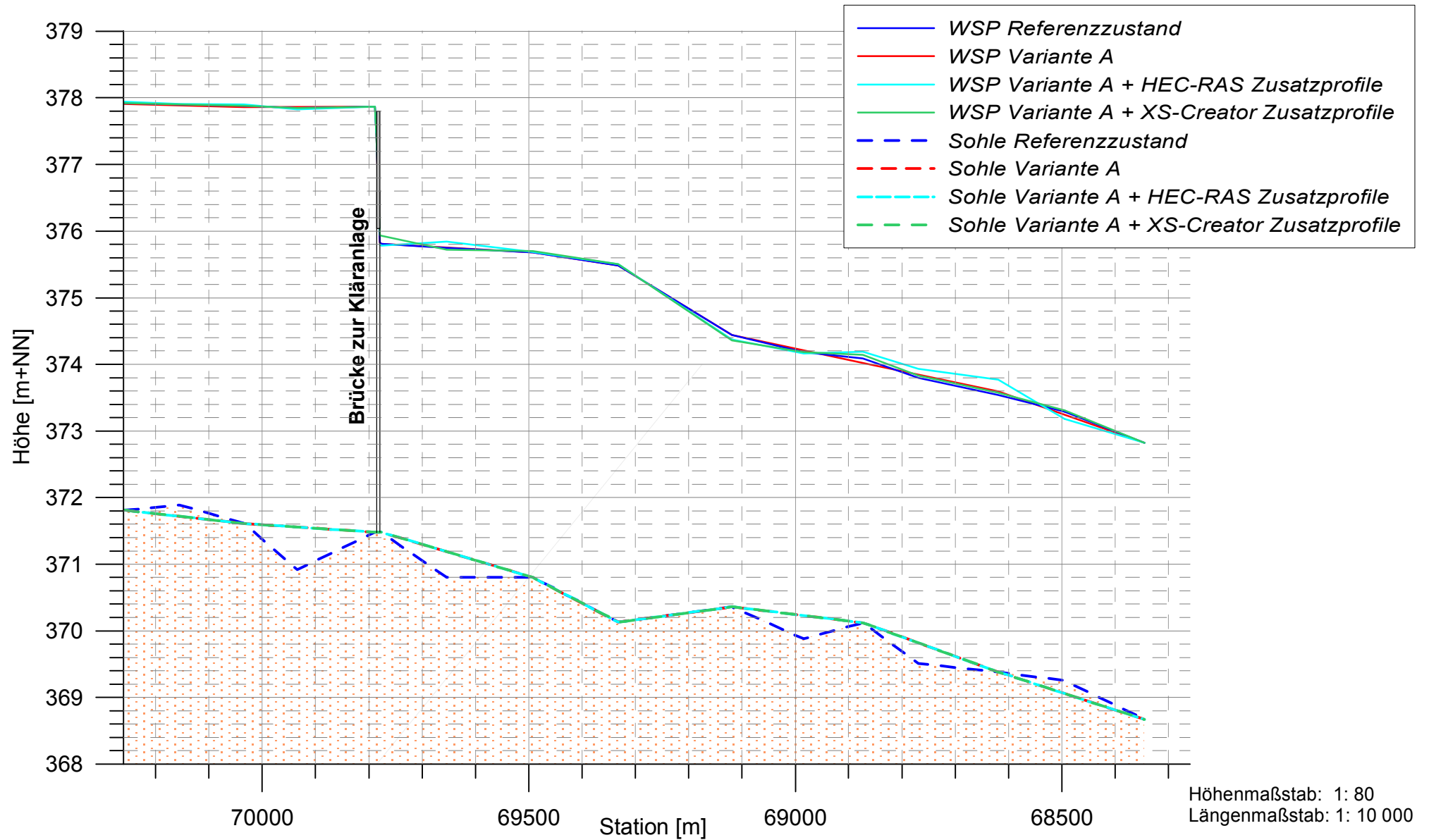
Anlage D.1.6 Neckar uh. Mühlen: Querprofilgeometrienvergleich Referenzzustand/ Variante C mit Zusatzprofilen durch XS-Creator



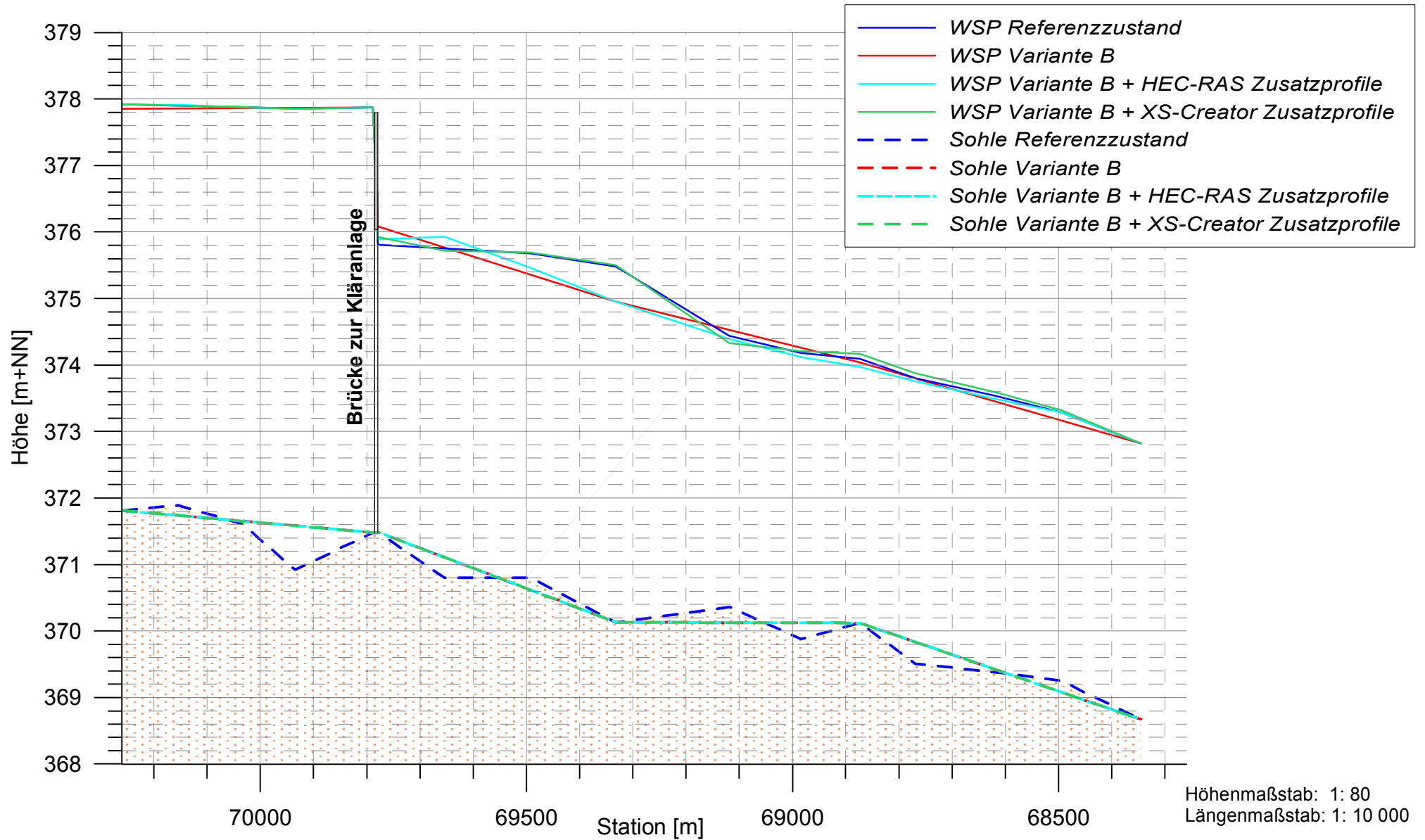
Anlage D.1.6 Neckar uh. Mühlen: Querprofilgeometrienvergleich Referenzzustand/ Variante C mit Zusatzprofilen durch XS-Creator



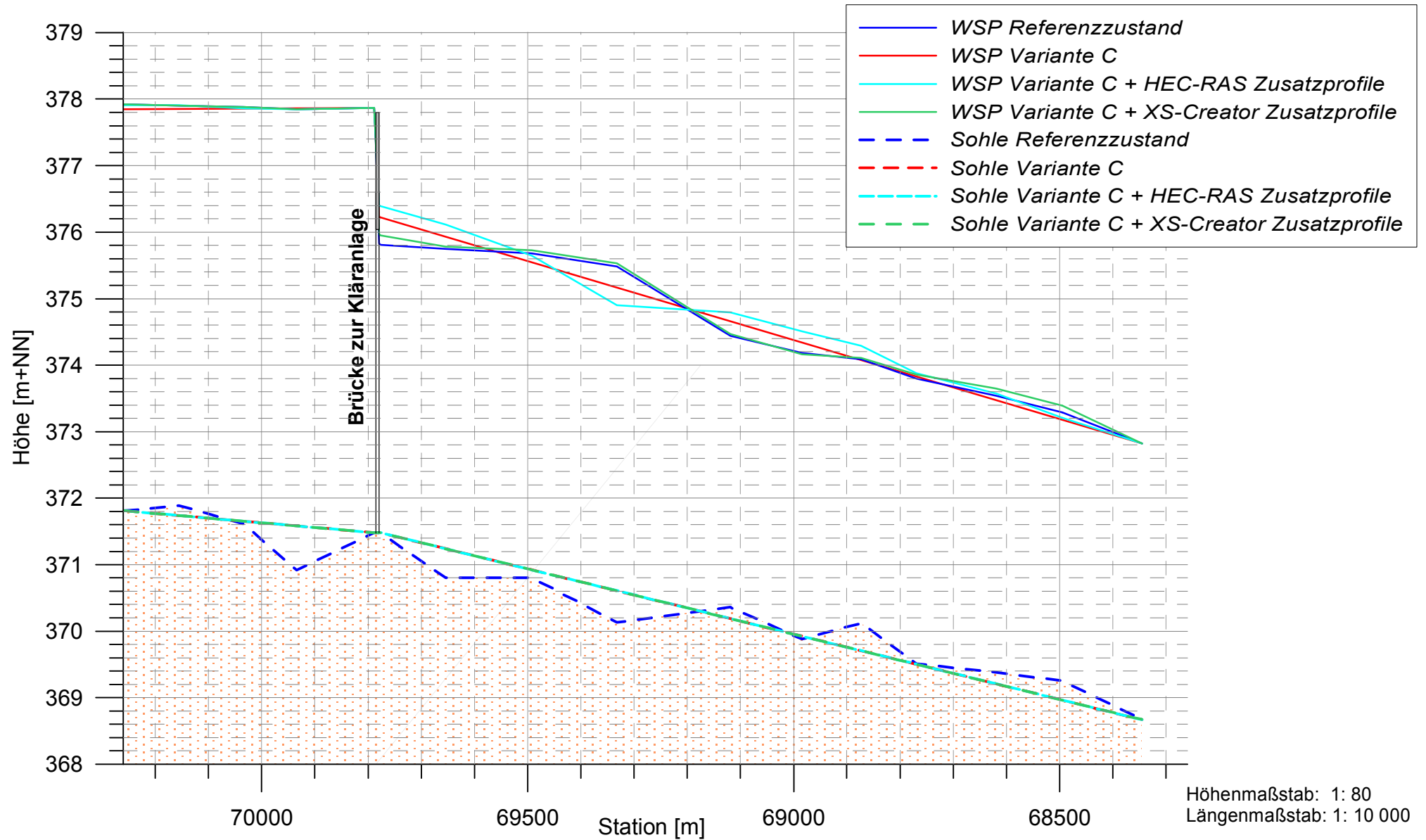
Anlage D.1.7 Neckar uh. Mühlen: Wasserspiegellängsschnitt für Variante A



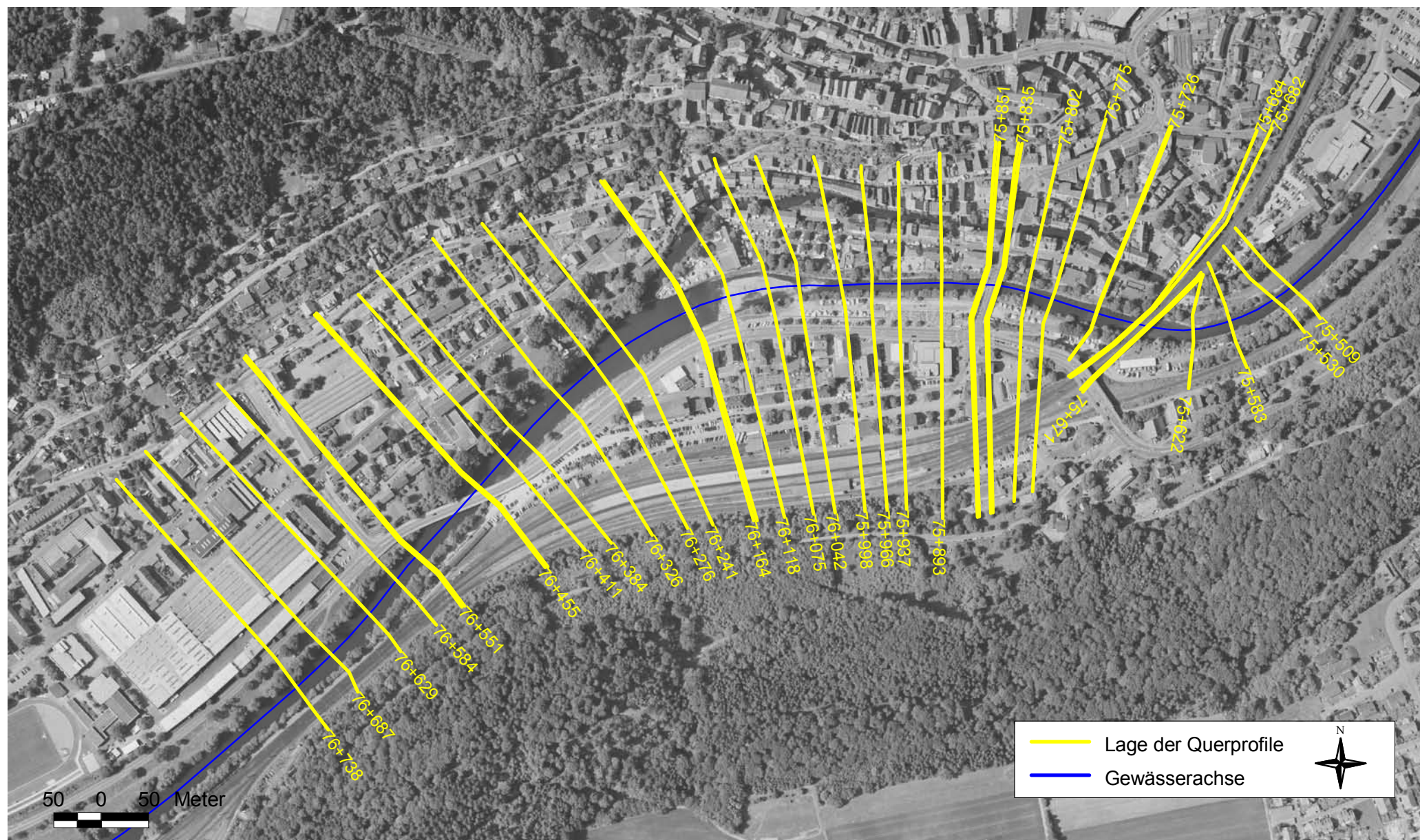
Anlage D.1.8 Neckar uh. Mühlen: Wasserspiegellängsschnitt für Variante B



Anlage D.1.9 Neckar uh. Mühlen: Wasserspiegellängsschnitt für Variante C



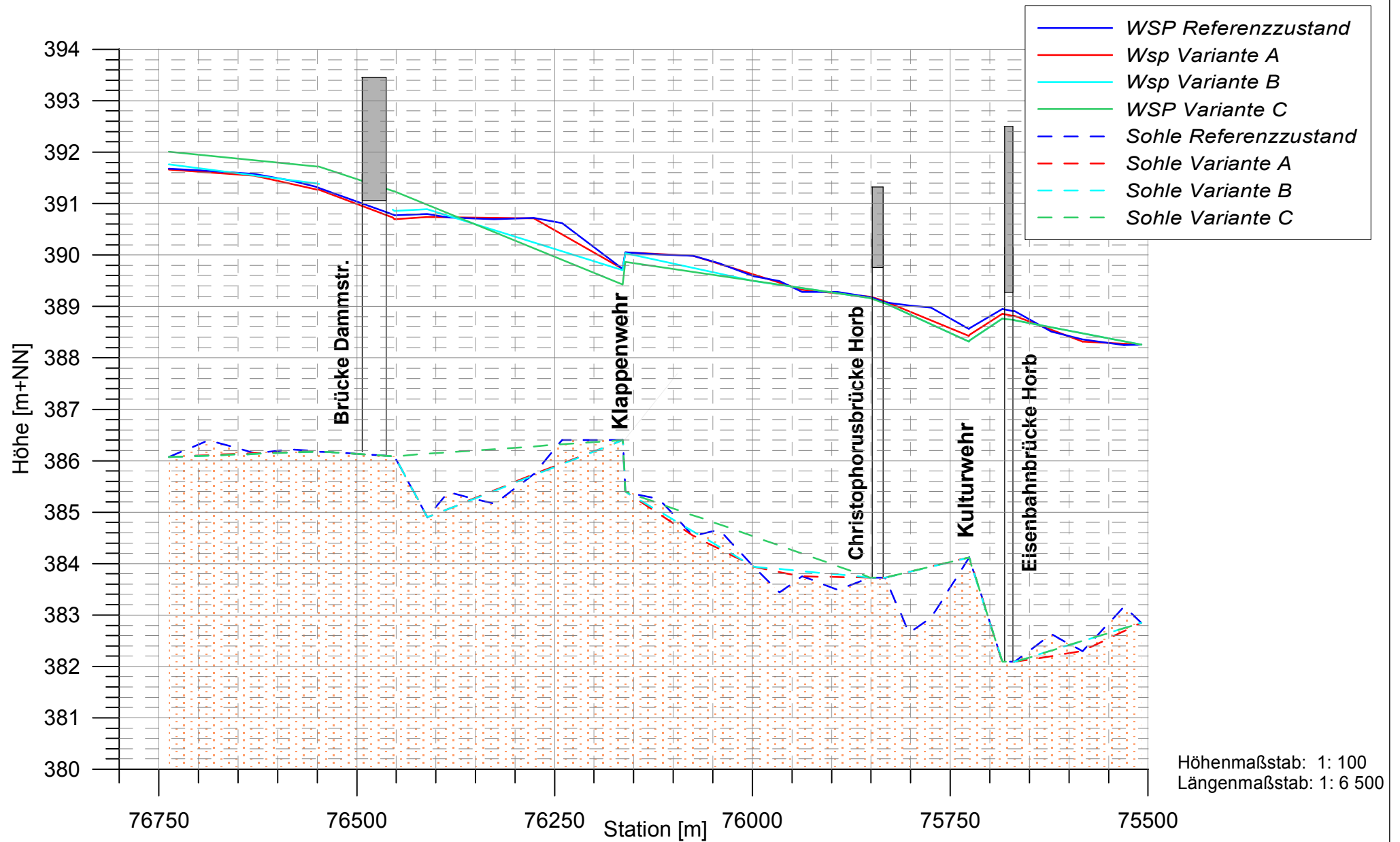
Anlage D.2.1 Neckar bei Horb: Lage der Querprofile im Referenzzustand



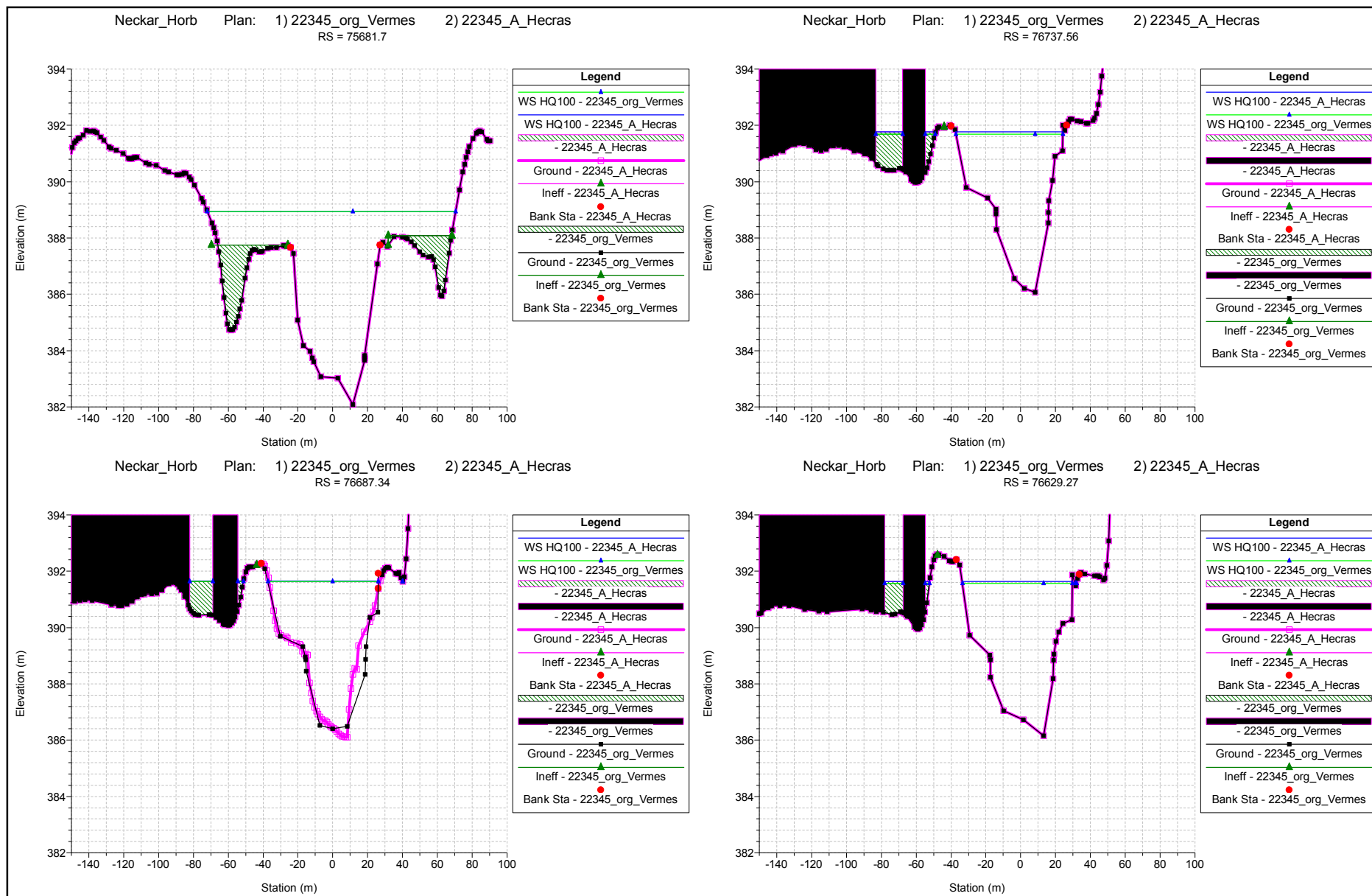
Anlage D.2.2 Neckar bei Horb: Querprofile der Variante A, B, C

Referenzzustand	Variante A	Variante B	Variante C	Bemerkung
Stationierung [km]				
76+738	X	X	X	
76+687	-	-	-	
76+629	X	-	-	
76+584	-	-	-	
76+551	X	X	X	Brücke Dammstr.
76+548	X	X	X	
76+455	X	X	X	
76+452	X	X	X	
76+411	X	X	-	
76+384	-	-	-	
76+326	-	-	-	
76+276	X	-	-	
76+241	-	-	-	
76+164	X	X	X	Klappenwehr
76+161	X	X	X	
76+118	-	-	-	
76+075	X	-	-	
76+042	-	-	-	
75+998	X	X	-	
75+966	-	-	-	
75+937	X	-	-	
75+893	-	-	-	
75+851	X	X	X	Christophorusbrücke
75+849	X	X	X	
75+835	X	X	X	
75+832	X	X	X	
75+802	-	-	-	
75+775	-	-	-	
75+726	X	X	X	Kulturwehr
75+725	X	X	X	
75+684	X	X	X	Eisenbahnbrücke
75+682	X	X	X	
75+671	X	X	X	
75+668	X	X	X	
75+622	-	-	-	
75+583	X	-	-	
75+530	-	-	-	
75+509	X	X	X	
X = Profile wurden berücksichtigt - = Profile blieben unberücksichtigt				

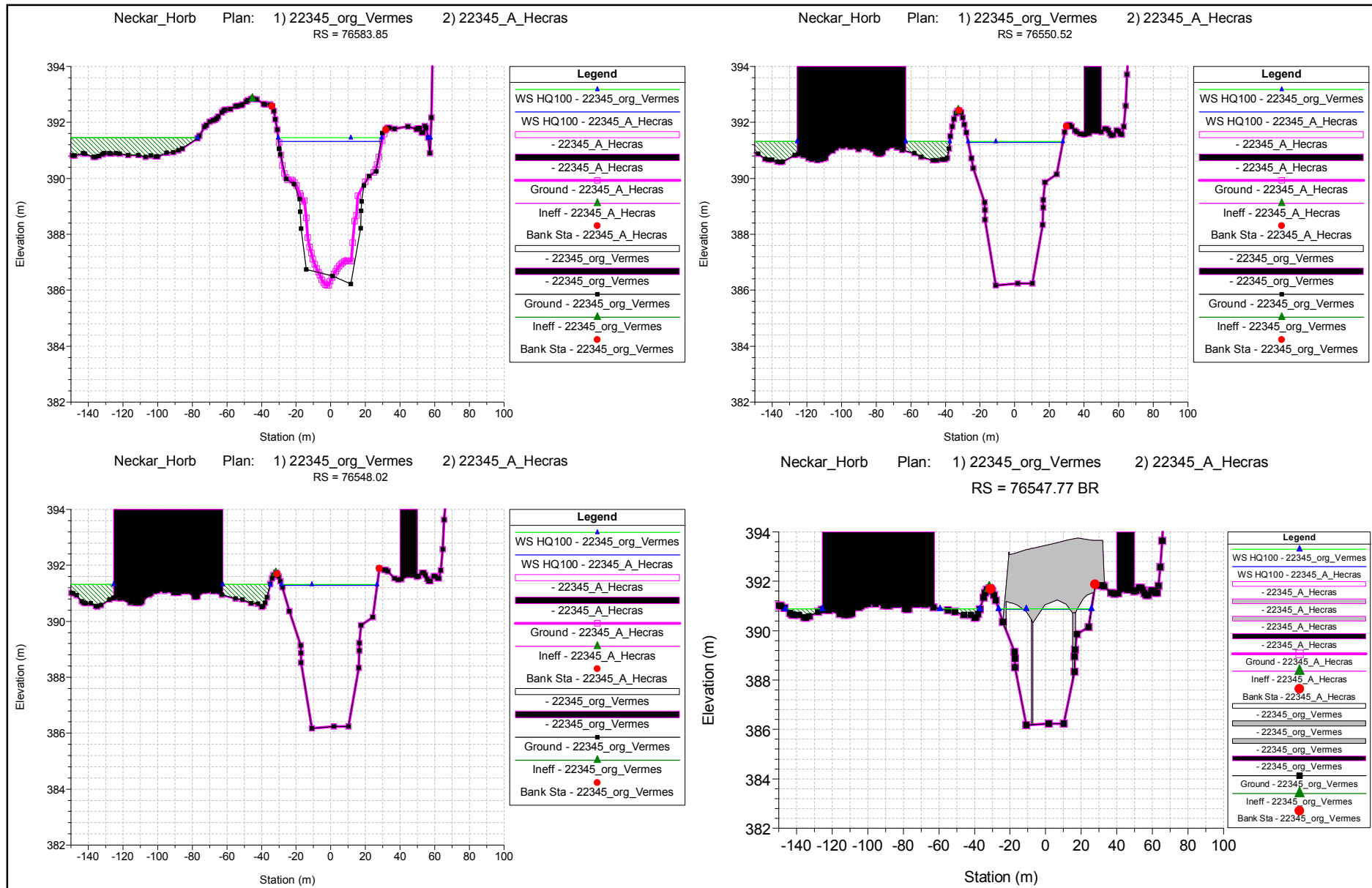
Anlage D.2.3 Neckar bei Horb: Wasserspiegellängsschnitt für die Vermessungsvarianten A, B und C (ohne Zusatzprofile)



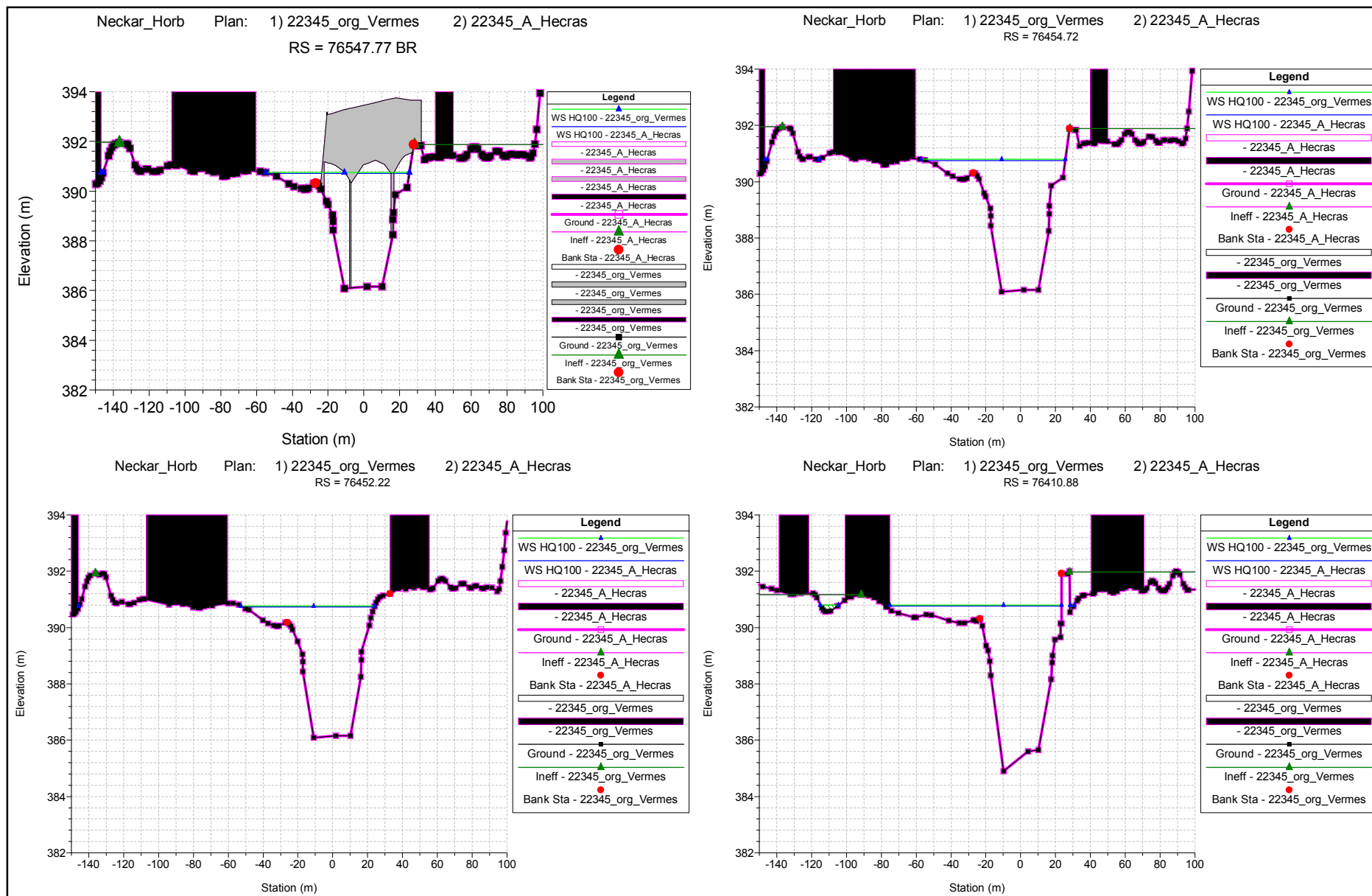
Anlage D.2.4 Neckar bei Horb: Querprofilgeometrienvergleich Referenzzustand/ Variante A mit Zusatzprofilen durch XS-Creator



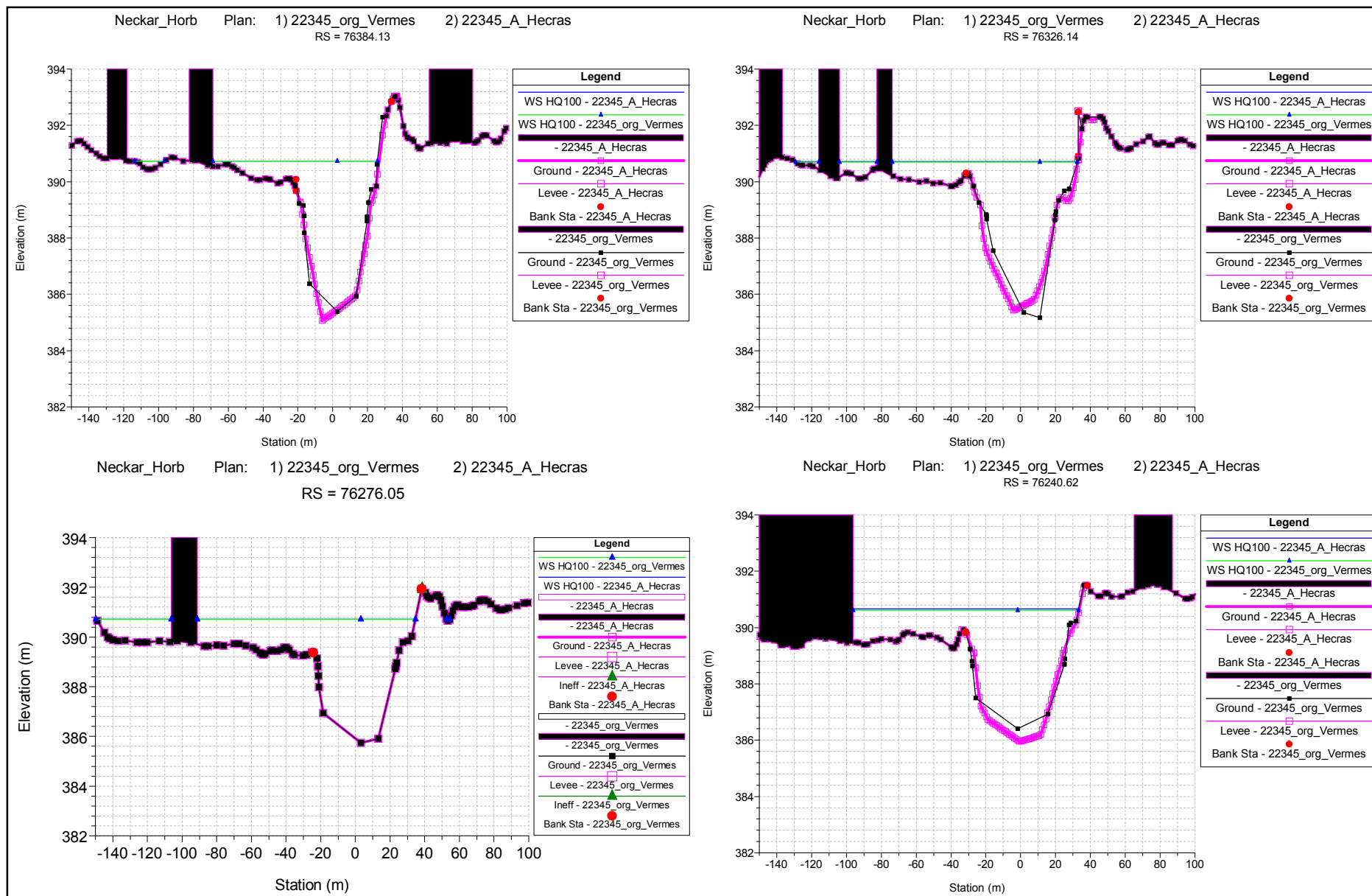
Anlage D.2.4 Neckar bei Horb: Querprofilgeometrienvergleich Referenzzustand/ Variante A mit Zusatzprofilen durch XS-Creator



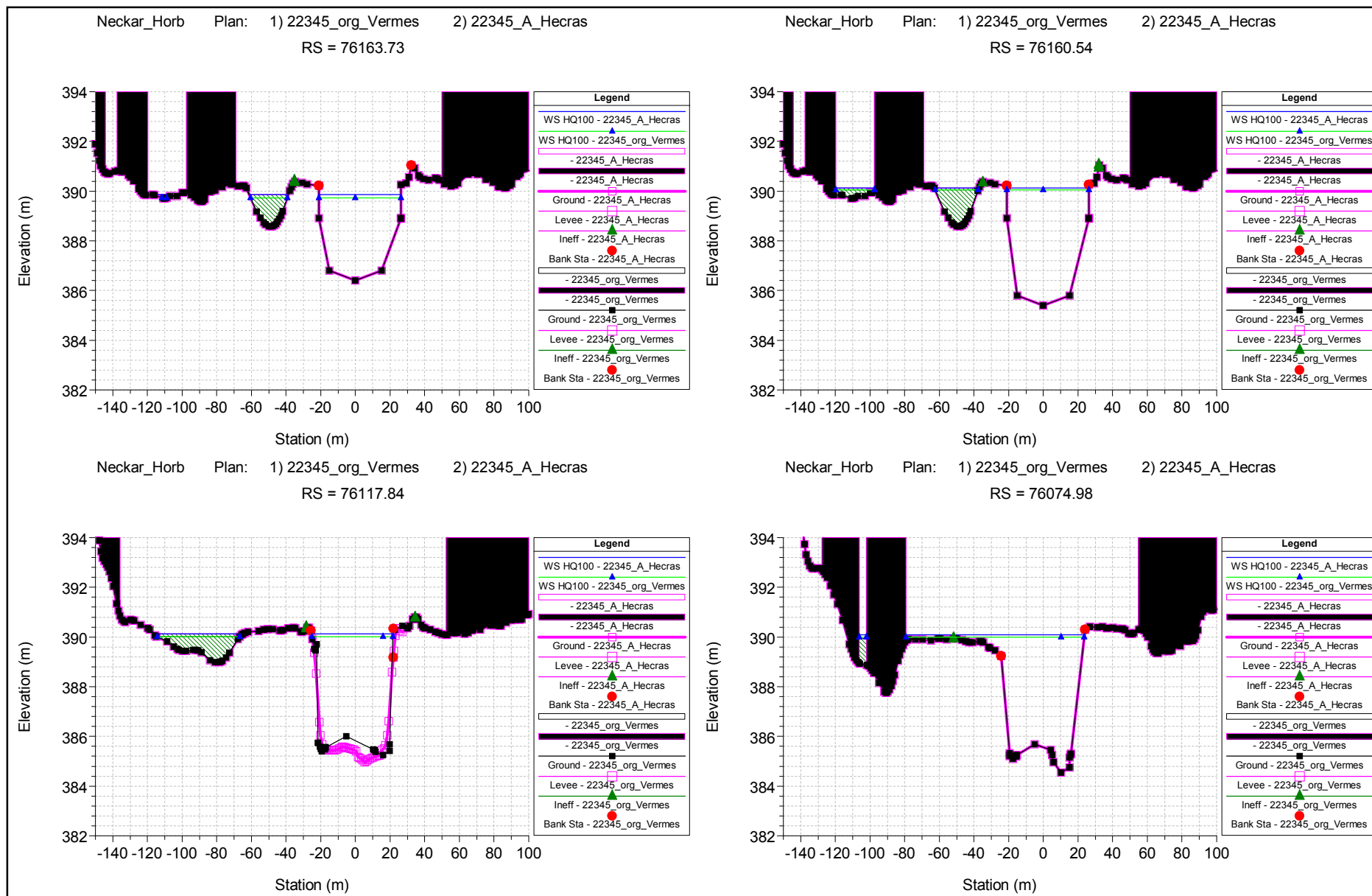
Anlage D.2.4 Neckar bei Horb: Querprofilgeometrienvergleich Referenzzustand/ Variante A mit Zusatzprofilen durch XS-Creator



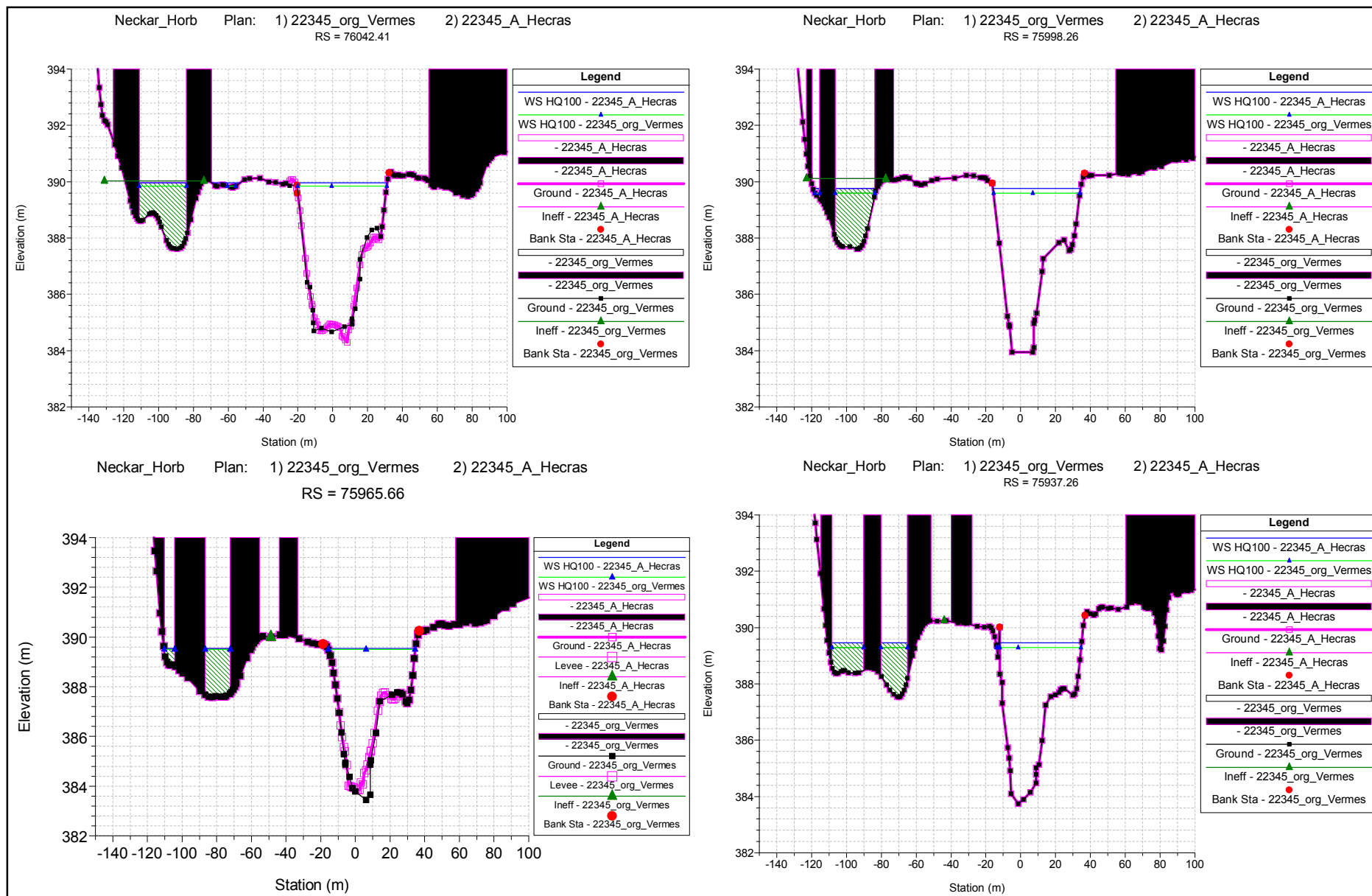
Anlage D.2.4 Neckar bei Horb: Querprofilgeometrienvergleich Referenzzustand/ Variante A mit Zusatzprofilen durch XS-Creator



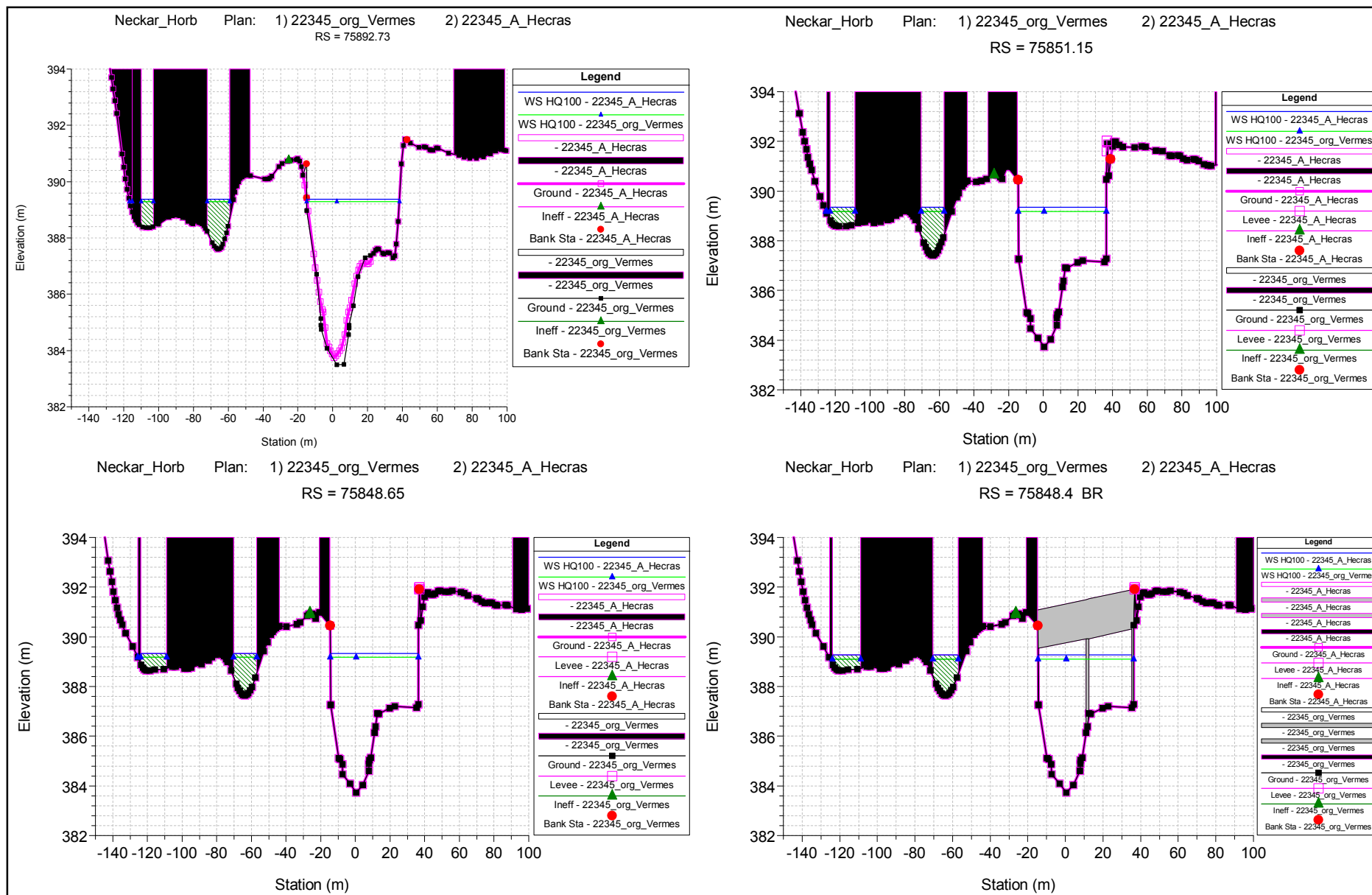
Anlage D.2.4 Neckar bei Horb: Querprofilgeometrienvergleich Referenzzustand/ Variante A mit Zusatzprofilen durch XS-Creator



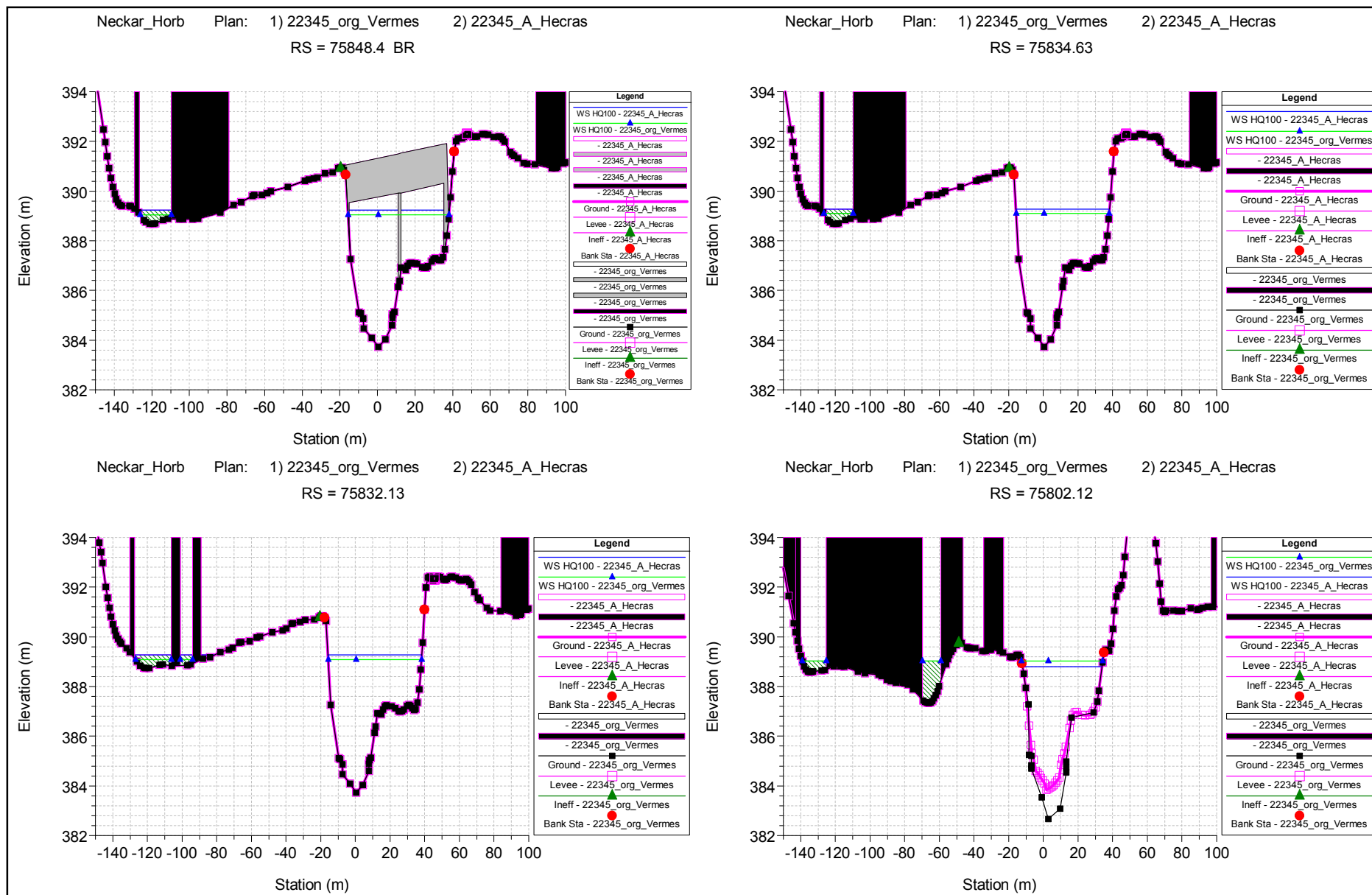
Anlage D.2.4 Neckar bei Horb: Querprofilgeometrienvergleich Referenzzustand/ Variante A mit Zusatzprofilen durch XS-Creator



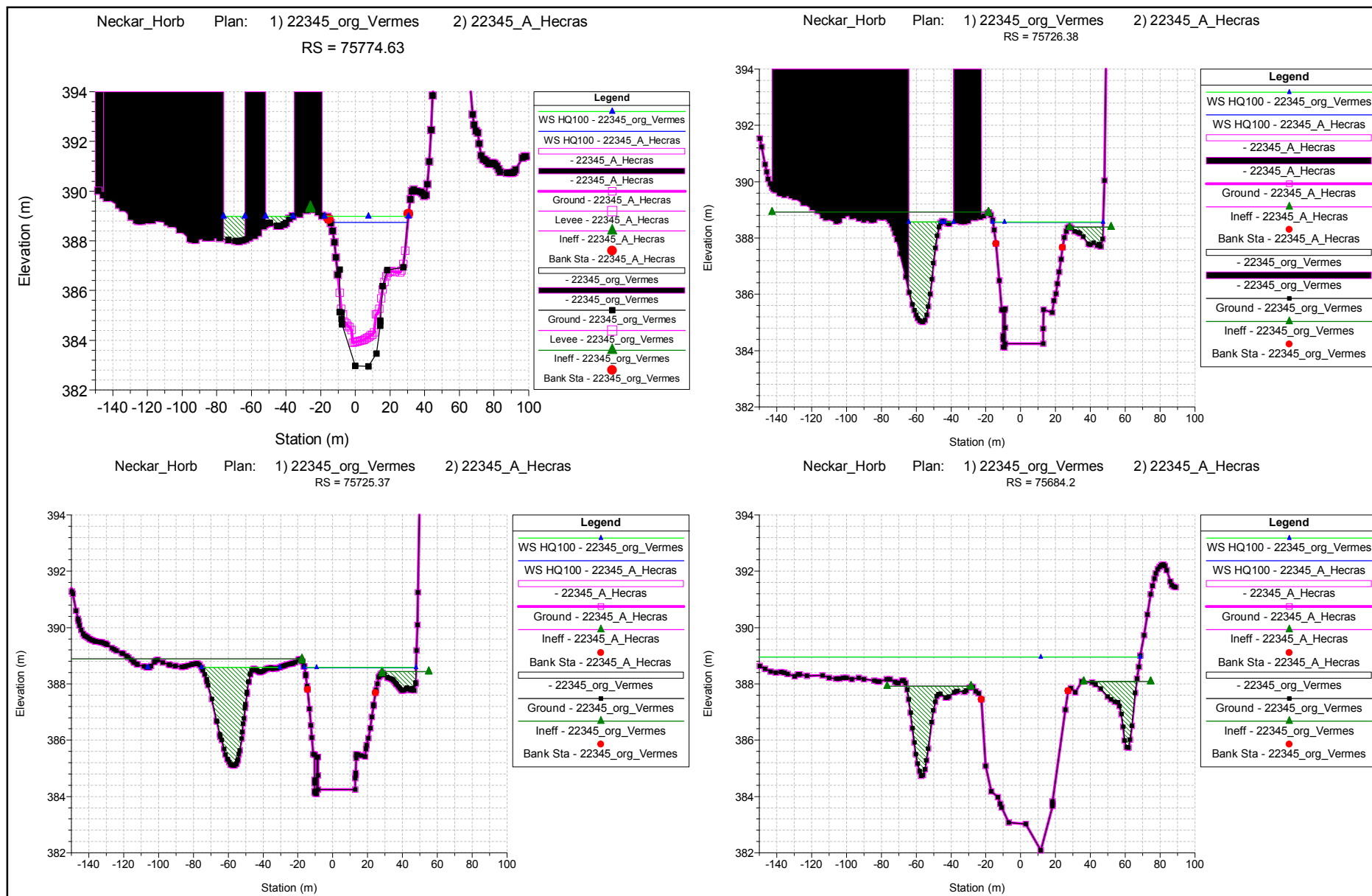
Anlage D.2.4 Neckar bei Horb: Querprofilgeometrienvergleich Referenzzustand/ Variante A mit Zusatzprofilen durch XS-Creator



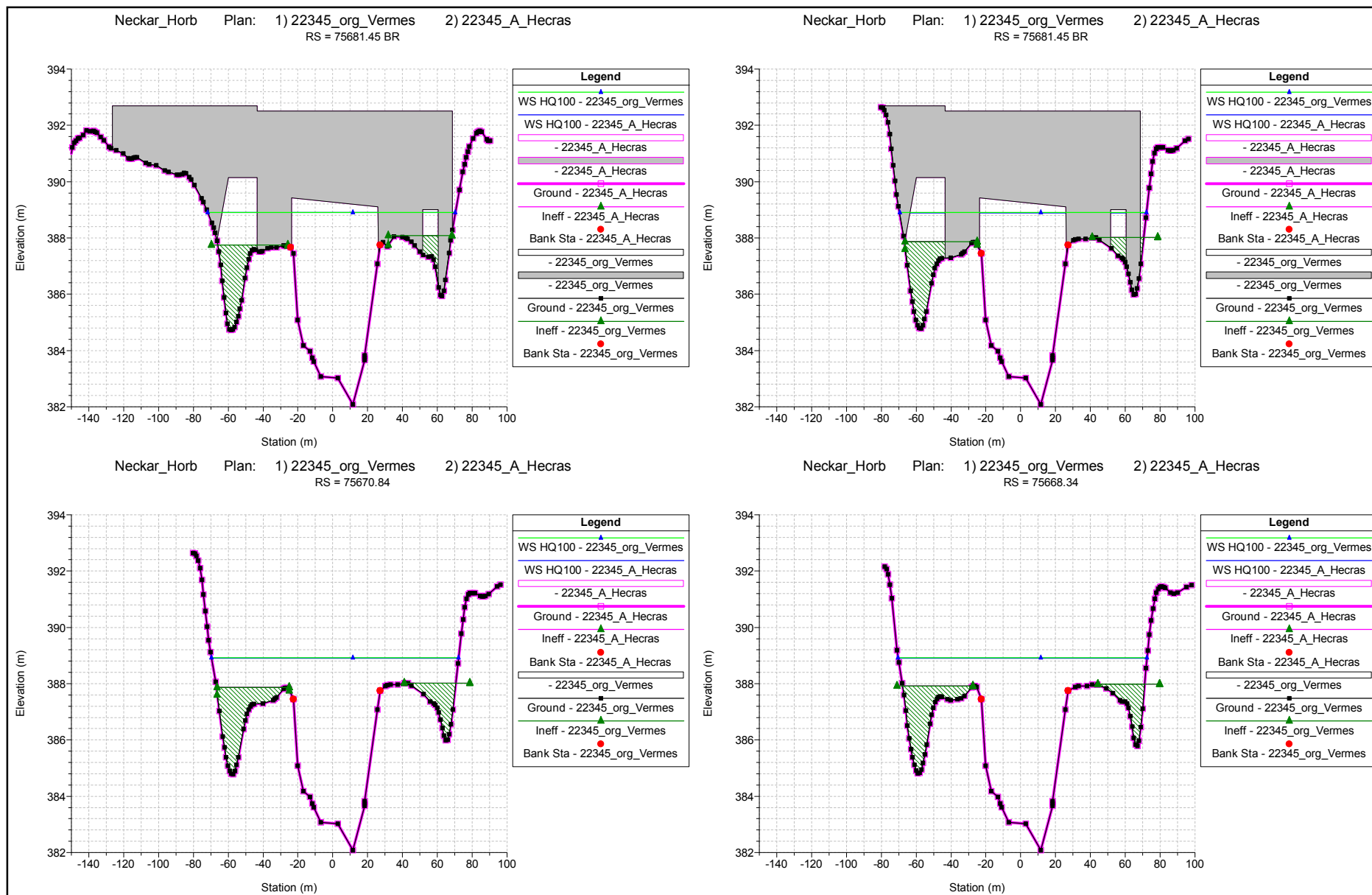
Anlage D.2.4 Neckar bei Horb: Querprofilgeometrienvergleich Referenzzustand/ Variante A mit Zusatzprofilen durch XS-Creator



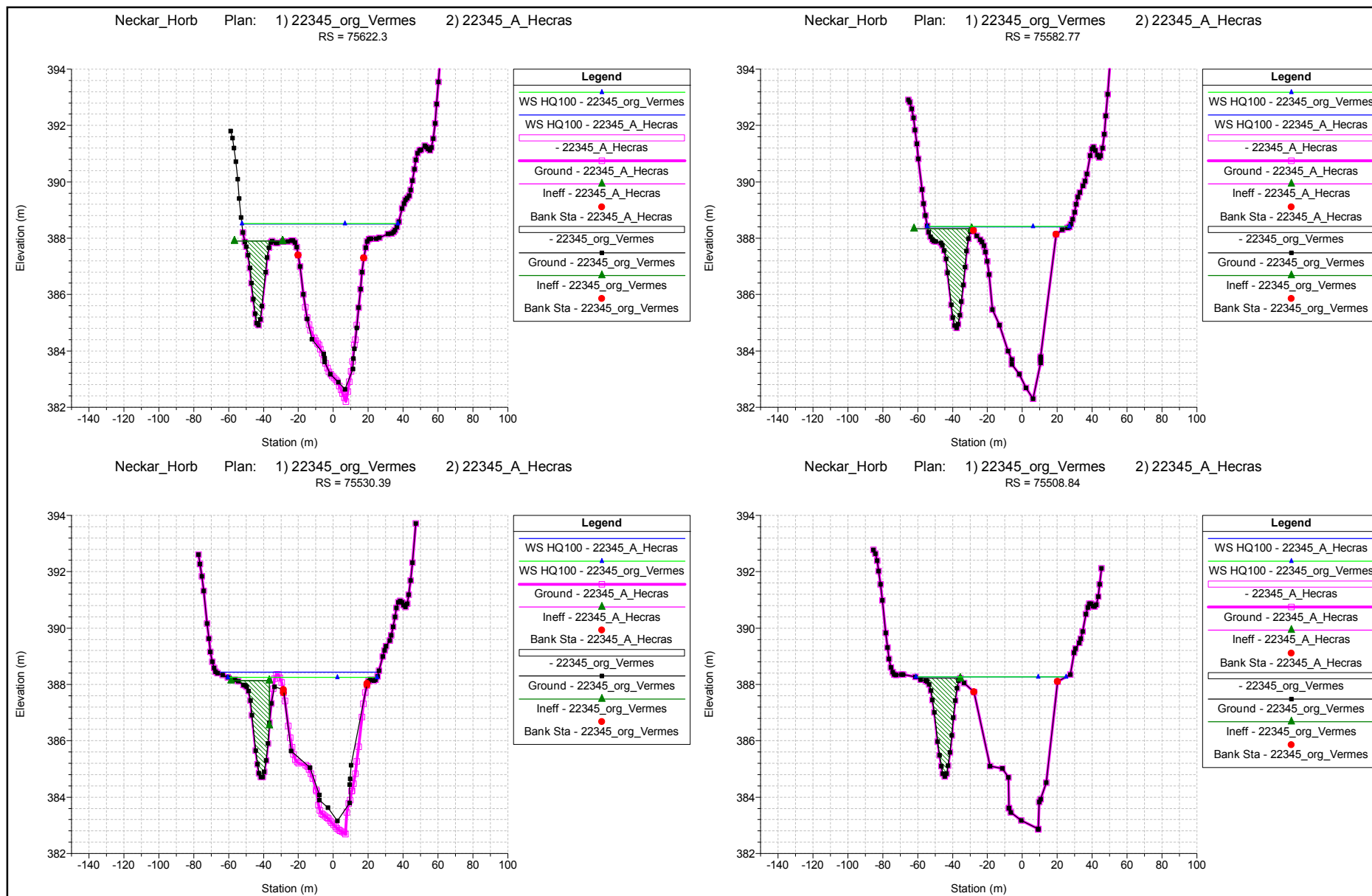
Anlage D.2.4 Neckar bei Horb: Querprofilgeometrienvergleich Referenzzustand/ Variante A mit Zusatzprofilen durch XS-Creator



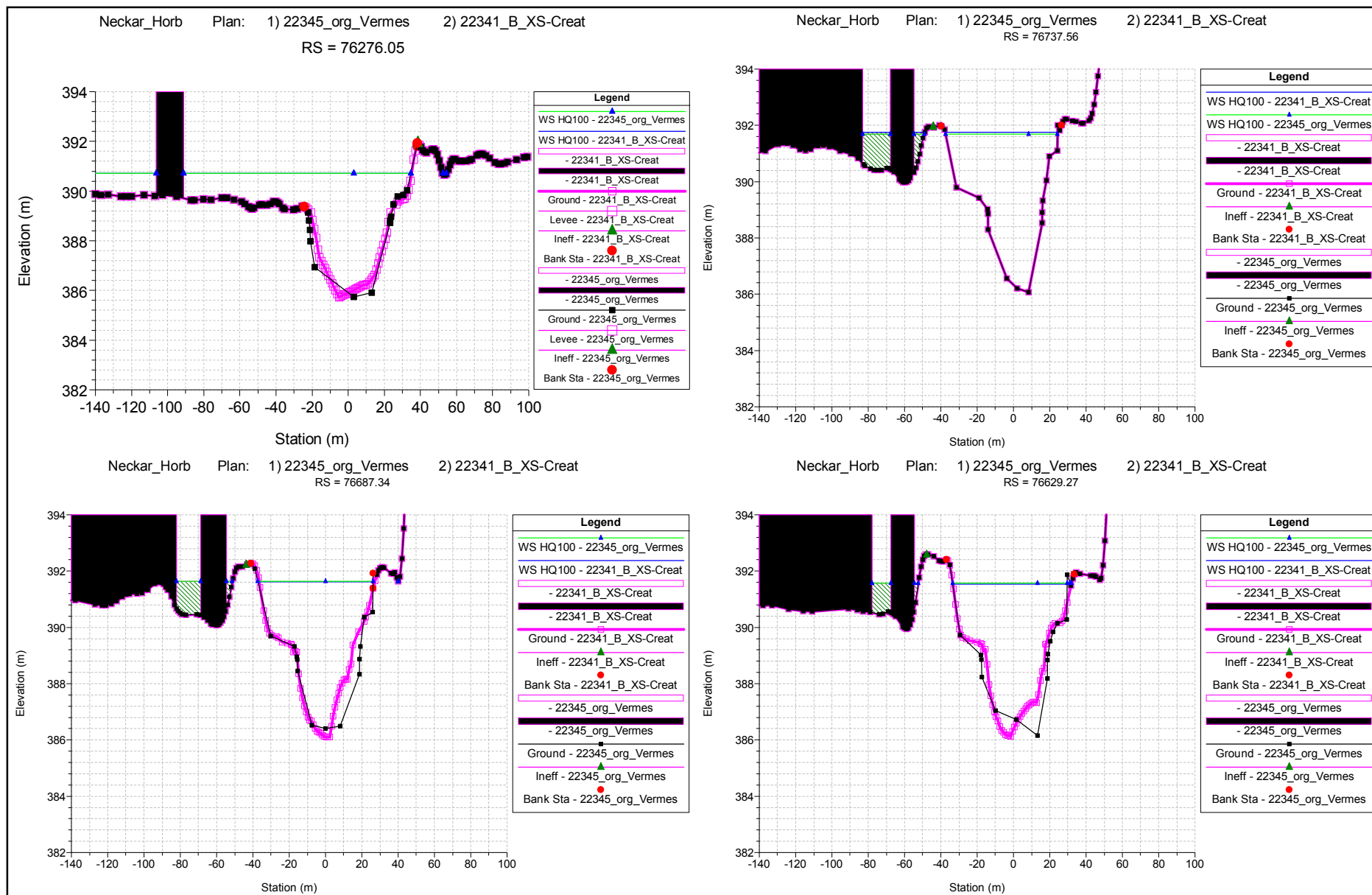
Anlage D.2.4 Neckar bei Horb: Querprofilgeometrienvergleich Referenzzustand/ Variante A mit Zusatzprofilen durch XS-Creator



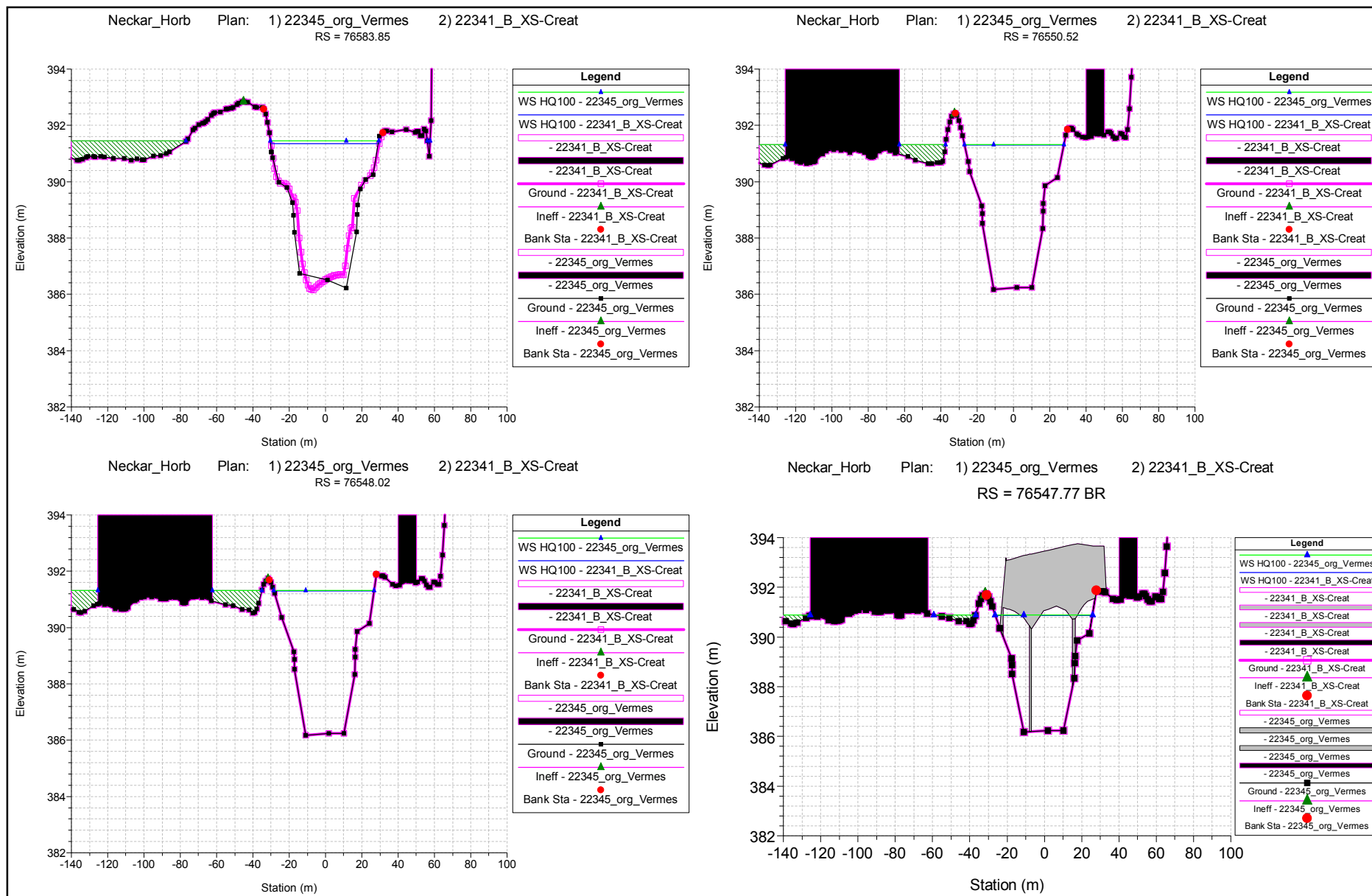
Anlage D.2.4 Neckar bei Horb: Querprofilgeometrienvergleich Referenzzustand/ Variante A mit Zusatzprofilen durch XS-Creator



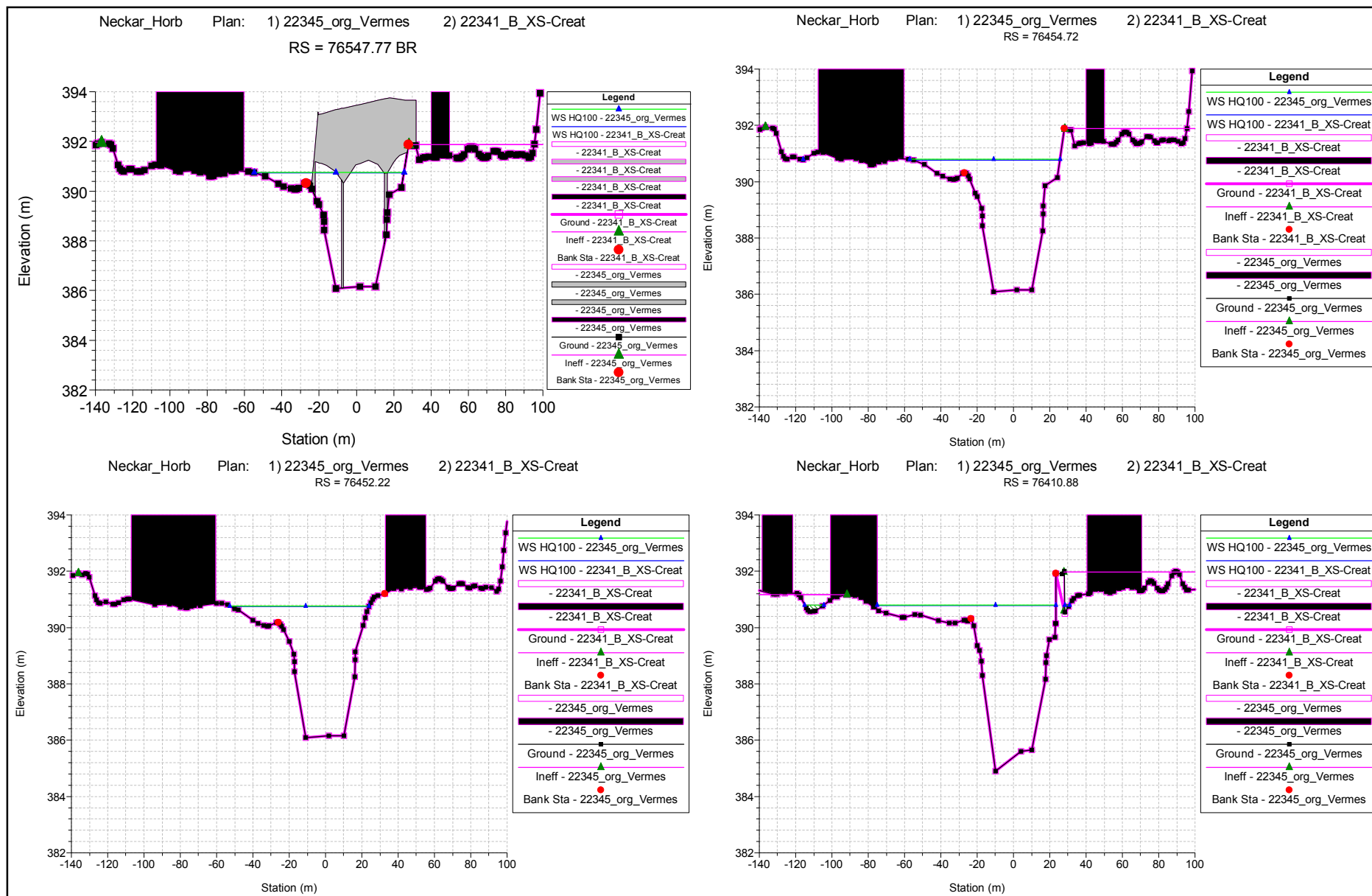
Anlage D.2.5 Neckar bei Horb: Querprofilgeometrienvergleich Referenzzustand/ Variante B mit Zusatzprofilen durch XS-Creator



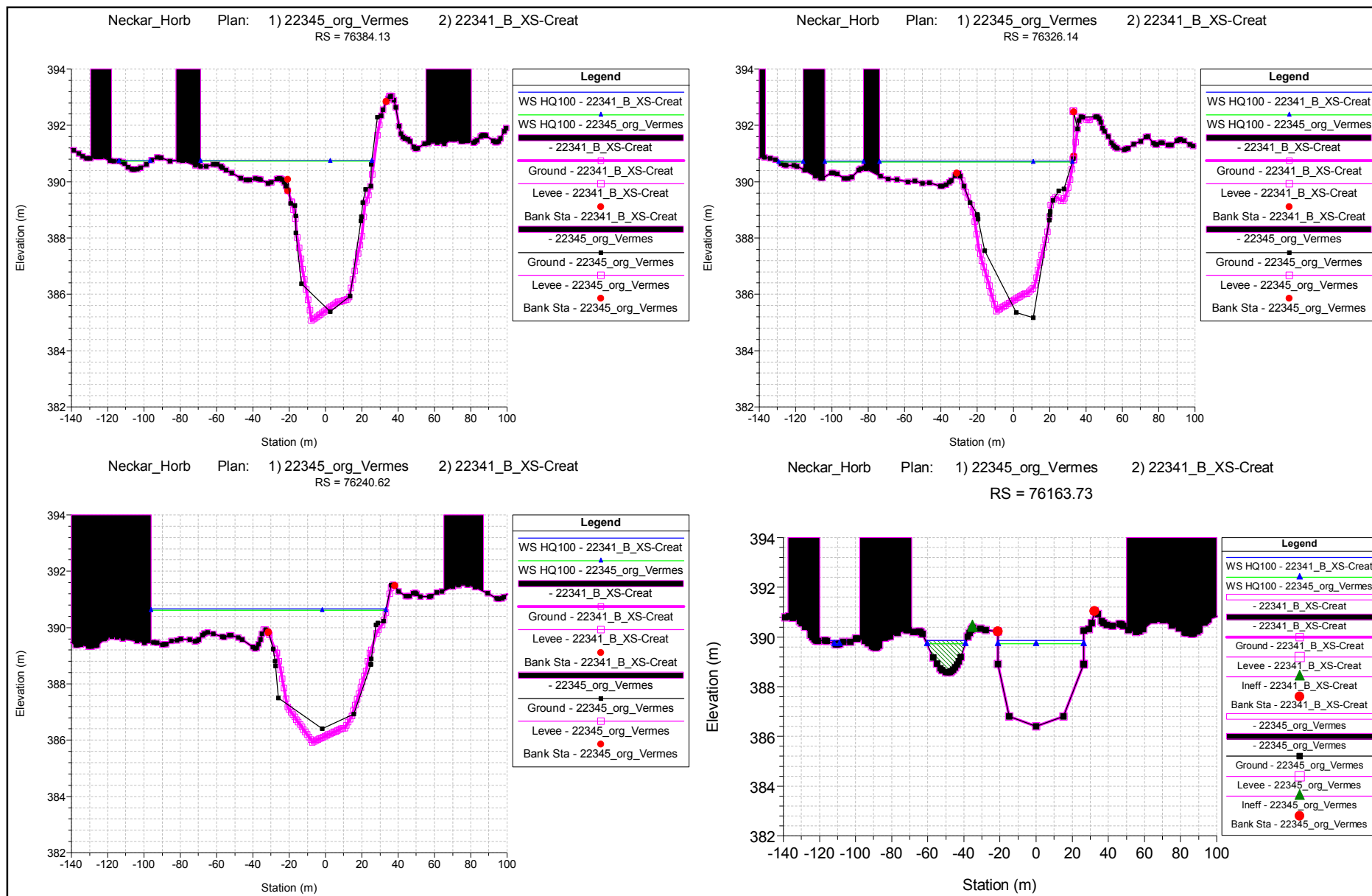
Anlage D.2.5 Neckar bei Horb: Querprofilgeometrienvergleich Referenzzustand/ Variante B mit Zusatzprofilen durch XS-Creator



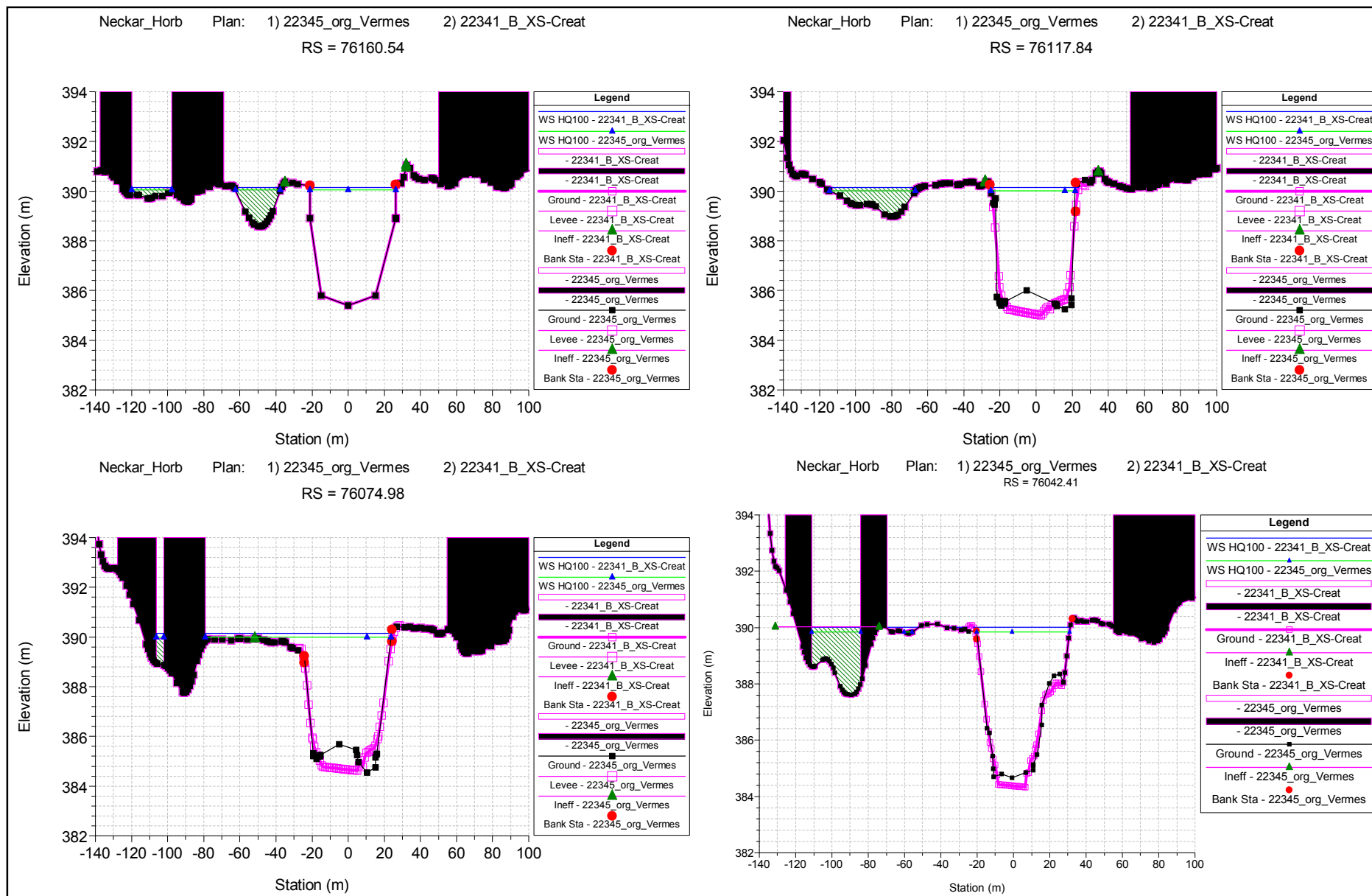
Anlage D.2.5 Neckar bei Horb: Querprofilgeometrienvergleich Referenzzustand/ Variante B mit Zusatzprofilen durch XS-Creator



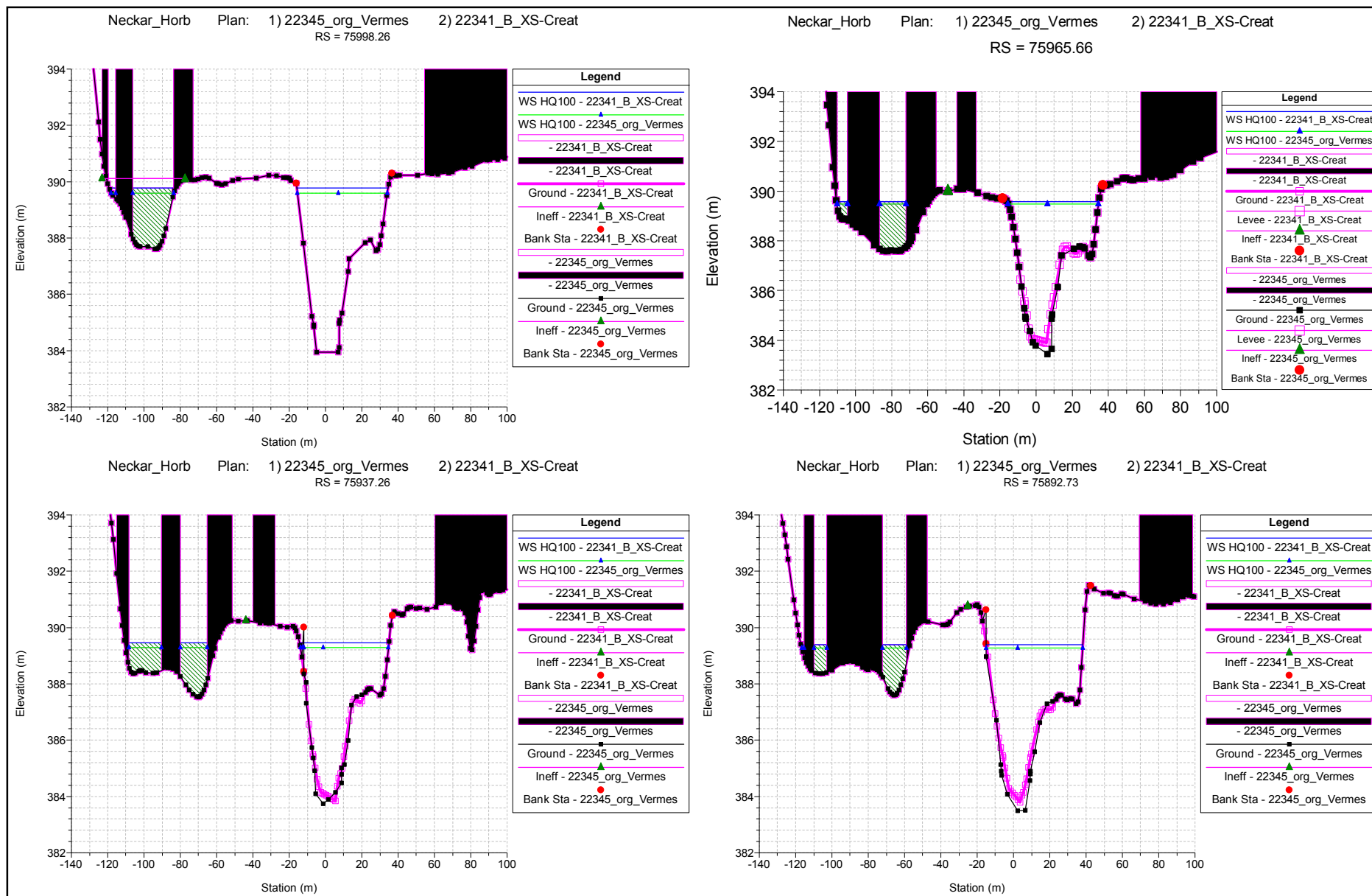
Anlage D.2.5 Neckar bei Horb: Querprofilgeometrienvergleich Referenzzustand/ Variante B mit Zusatzprofilen durch XS-Creator



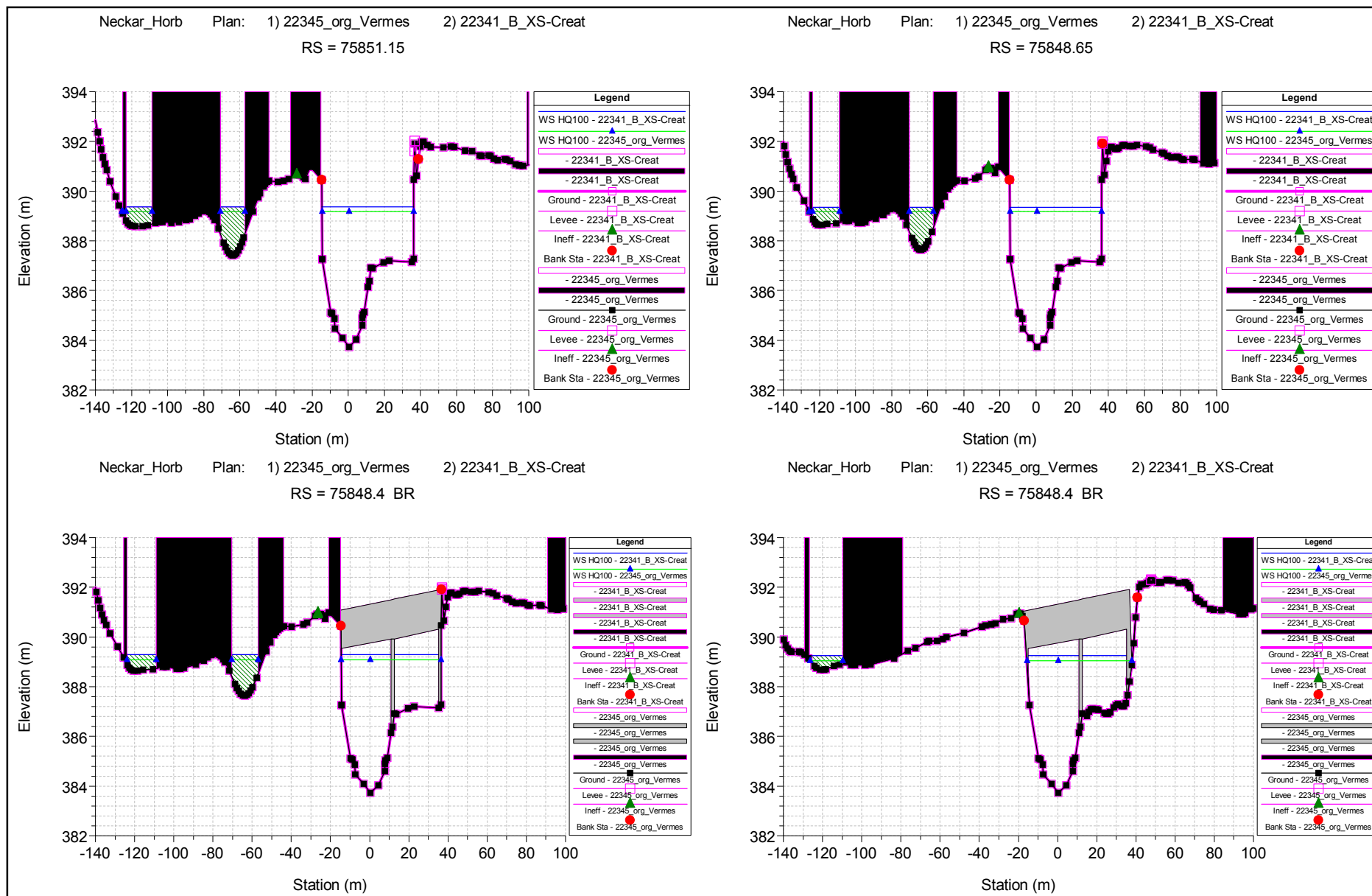
Anlage D.2.5 Neckar bei Horb: Querprofilgeometrienvergleich Referenzzustand/ Variante B mit Zusatzprofilen durch XS-Creator



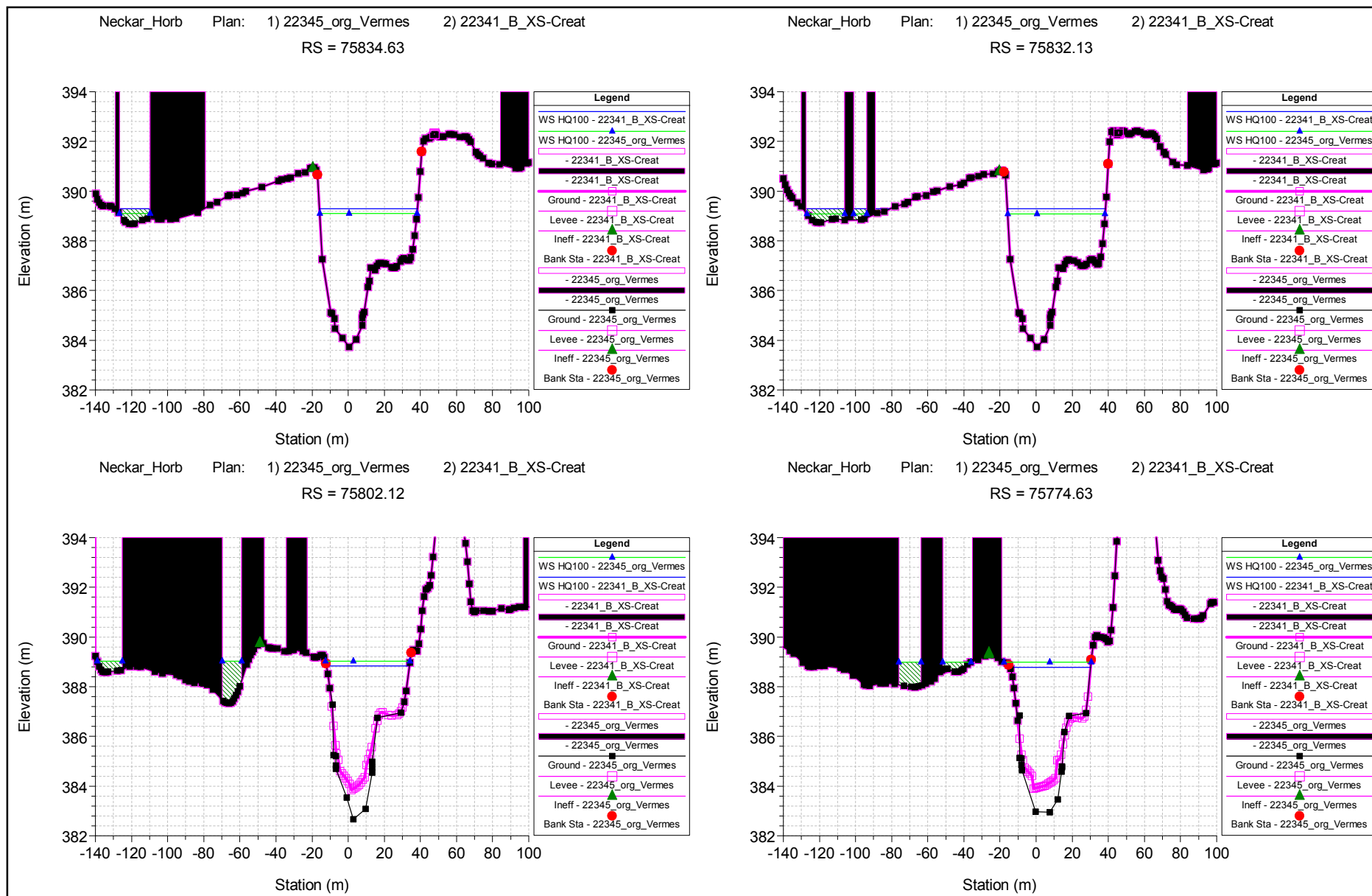
Anlage D.2.5 Neckar bei Horb: Querprofilgeometrienvergleich Referenzzustand/ Variante B mit Zusatzprofilen durch XS-Creator



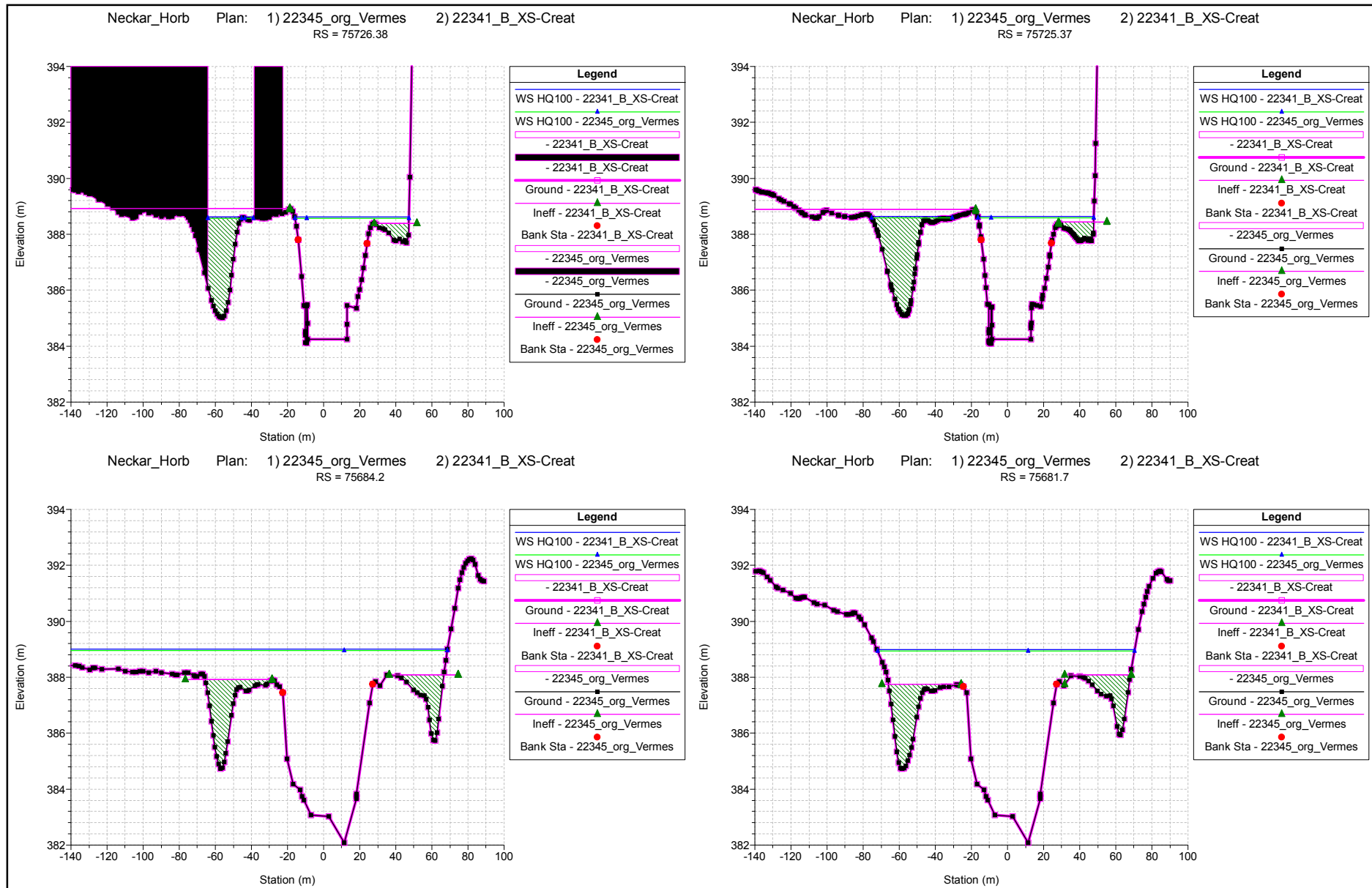
Anlage D.2.5 Neckar bei Horb: Querprofilgeometrienvergleich Referenzzustand/ Variante B mit Zusatzprofilen durch XS-Creator



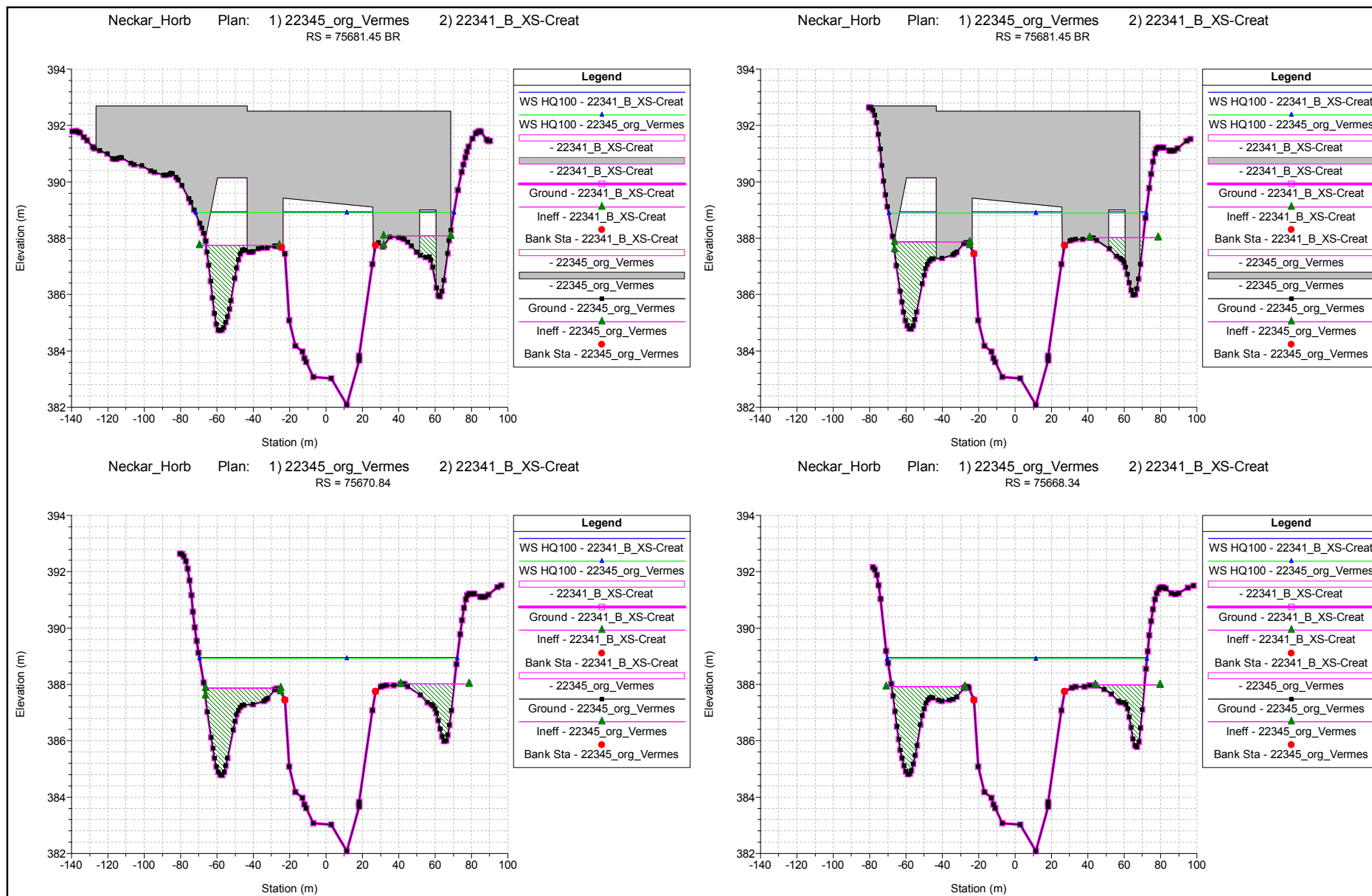
Anlage D.2.5 Neckar bei Horb: Querprofilgeometrienvergleich Referenzzustand/ Variante B mit Zusatzprofilen durch XS-Creator



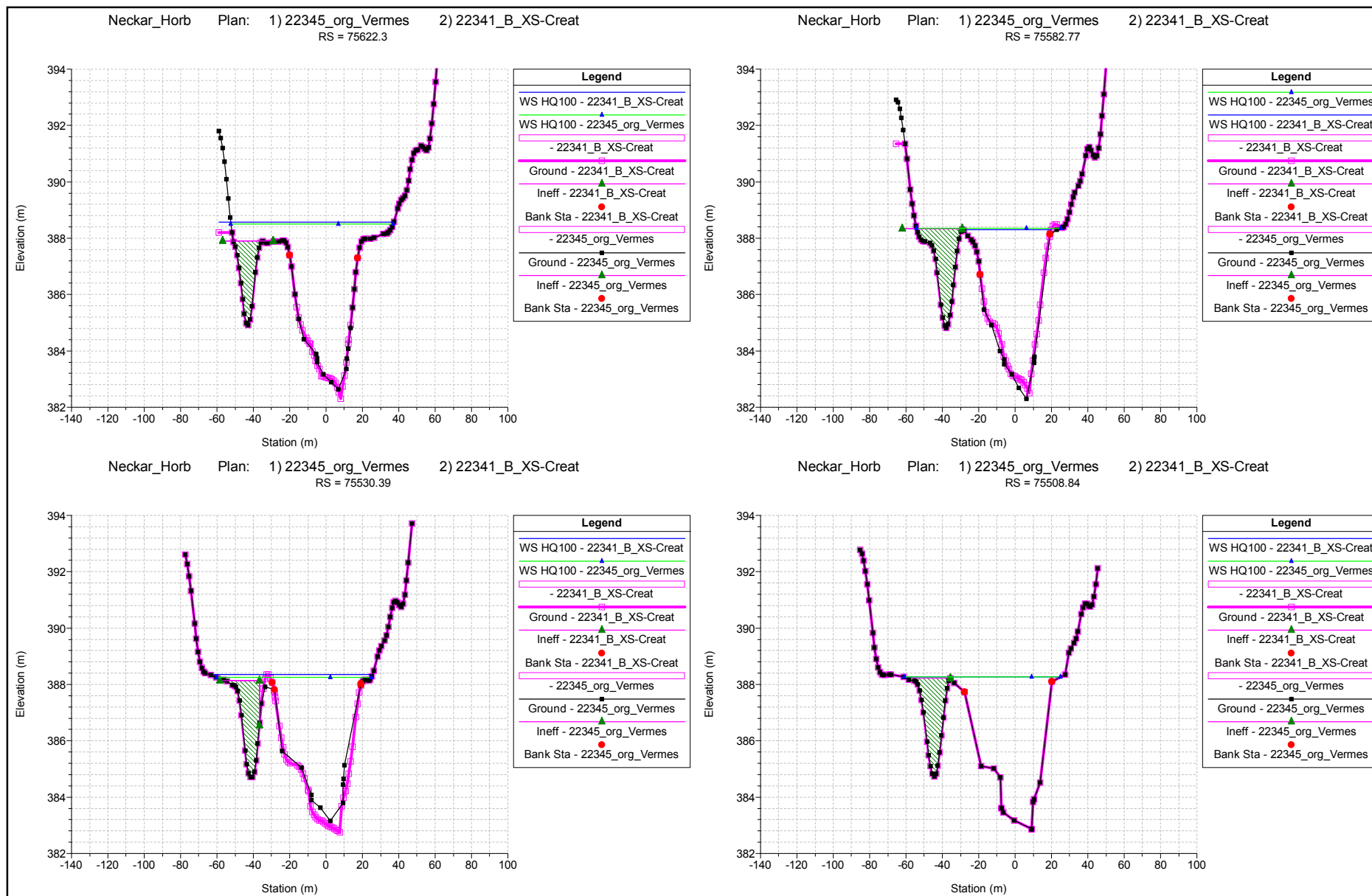
Anlage D.2.5 Neckar bei Horb: Querprofilgeometrienvergleich Referenzzustand/ Variante B mit Zusatzprofilen durch XS-Creator



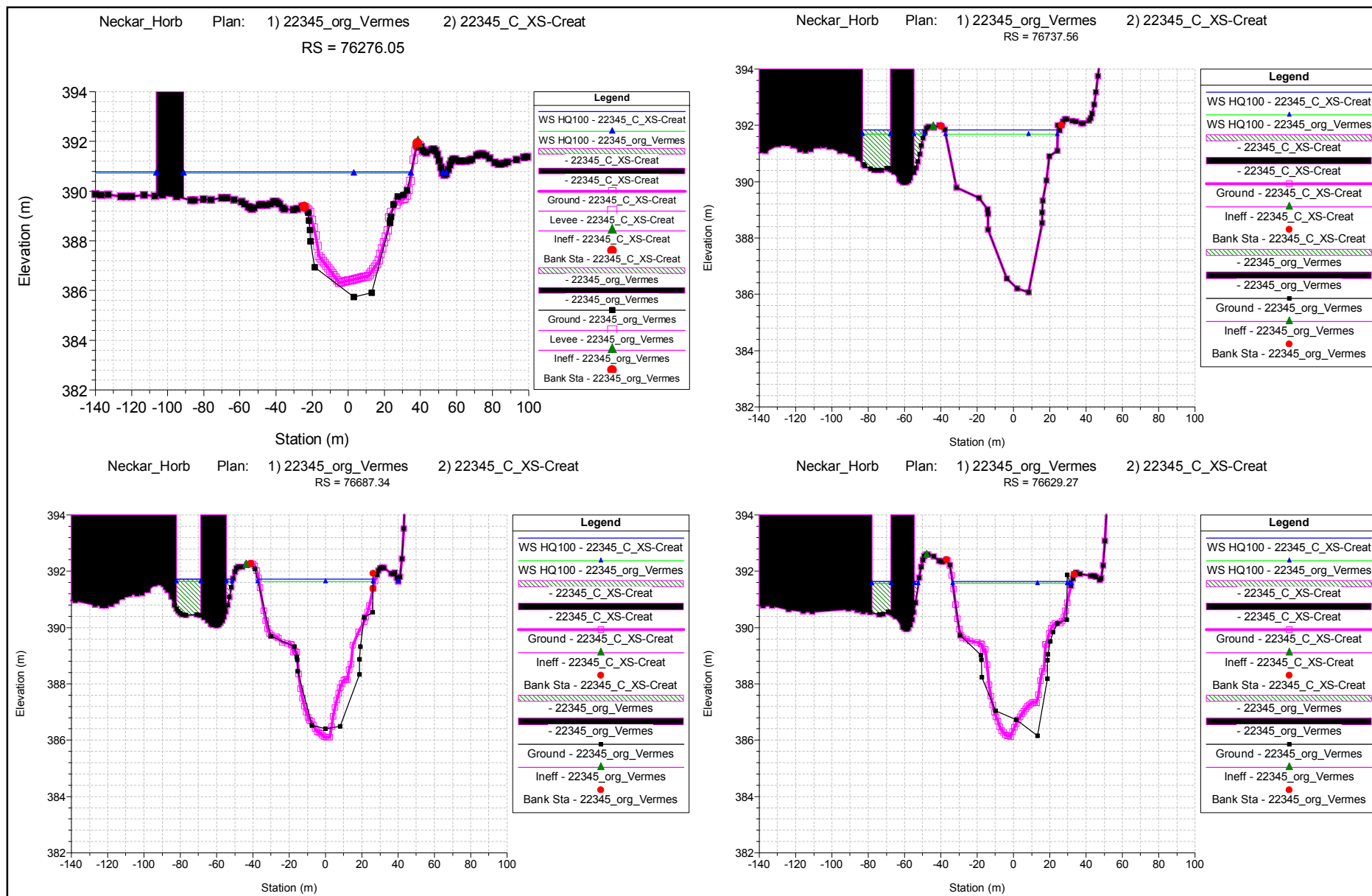
Anlage D.2.5 Neckar bei Horb: Querprofilgeometrienvergleich Referenzzustand/ Variante B mit Zusatzprofilen durch XS-Creator



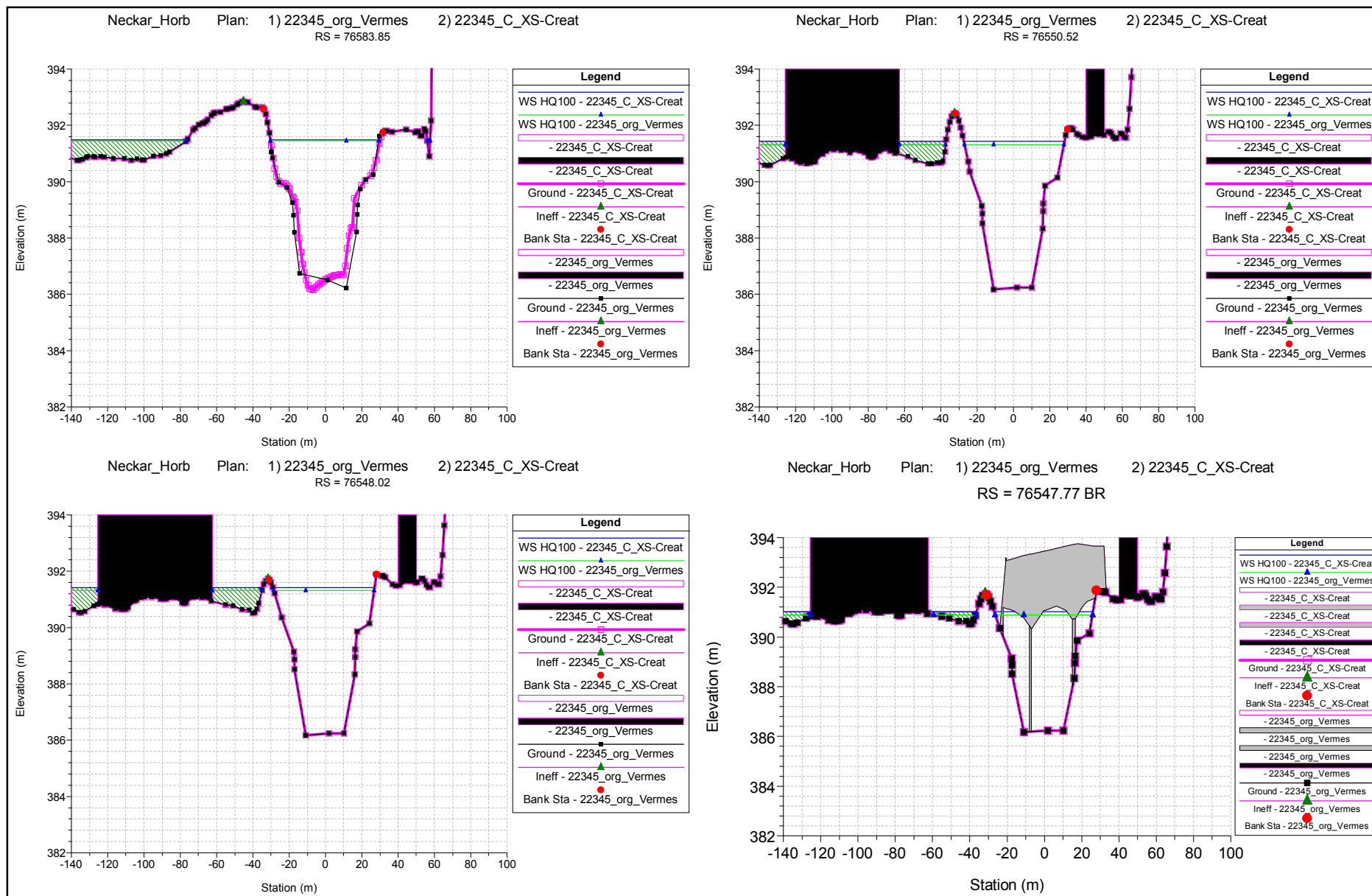
Anlage D.2.5 Neckar bei Horb: Querprofilgeometrienvergleich Referenzzustand/ Variante B mit Zusatzprofilen durch XS-Creator



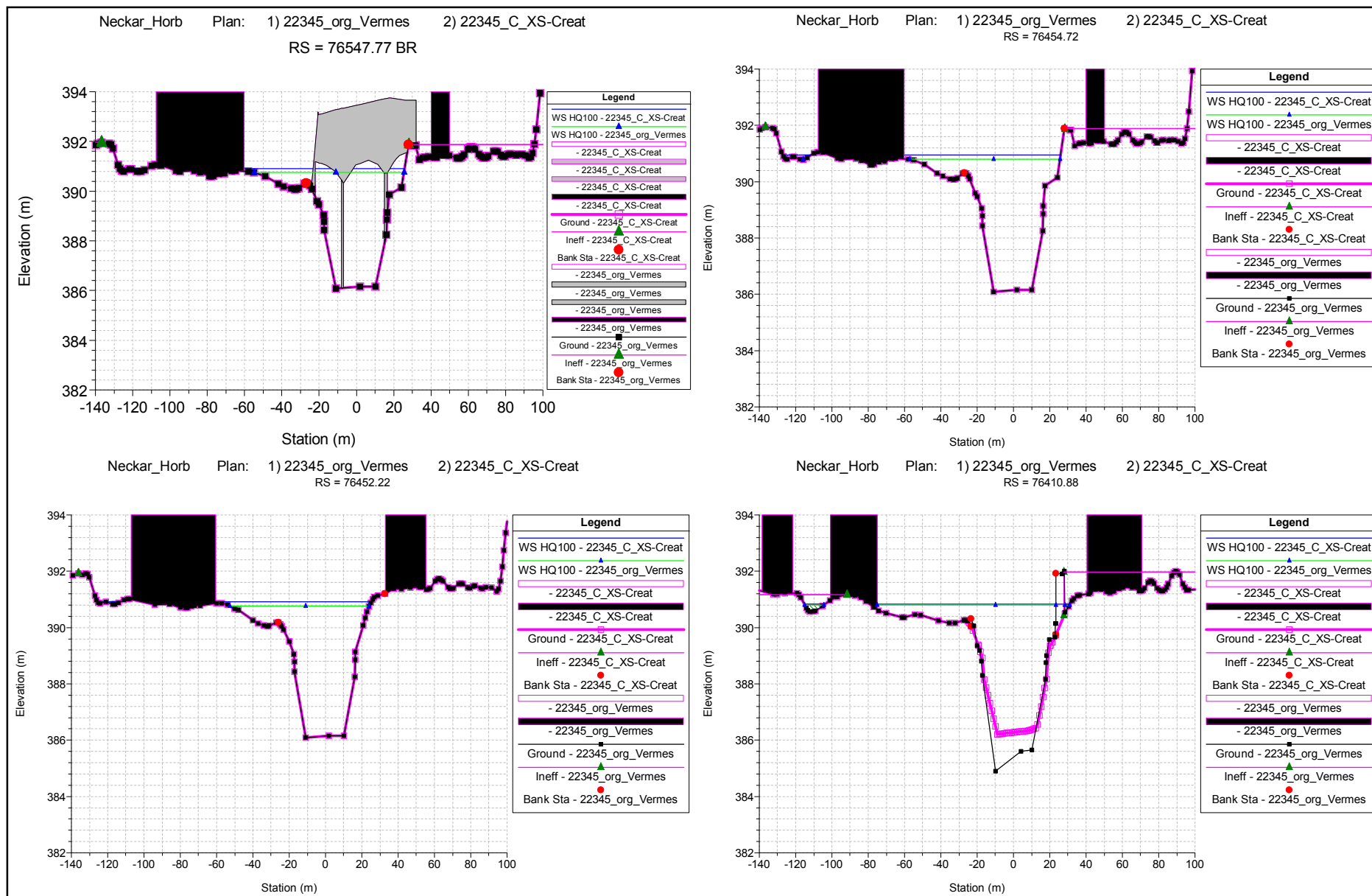
Anlage D.2.6 Neckar bei Horb: Querprofilgeometrienvergleich Referenzzustand/ Variante C mit Zusatzprofilen durch XS-Creator



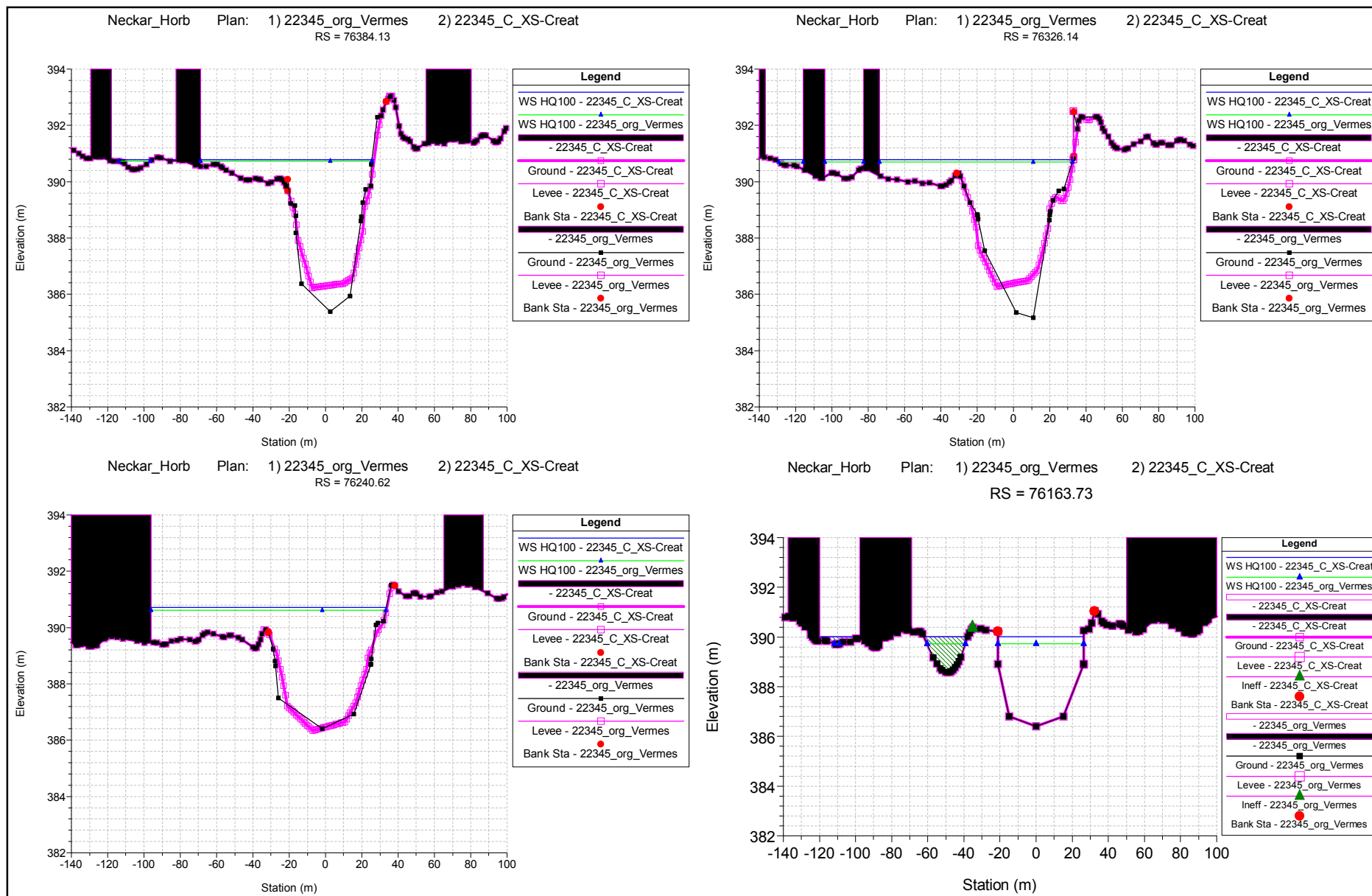
Anlage D.2.6 Neckar bei Horb: Querprofilgeometrienvergleich Referenzzustand/ Variante C mit Zusatzprofilen durch XS-Creator



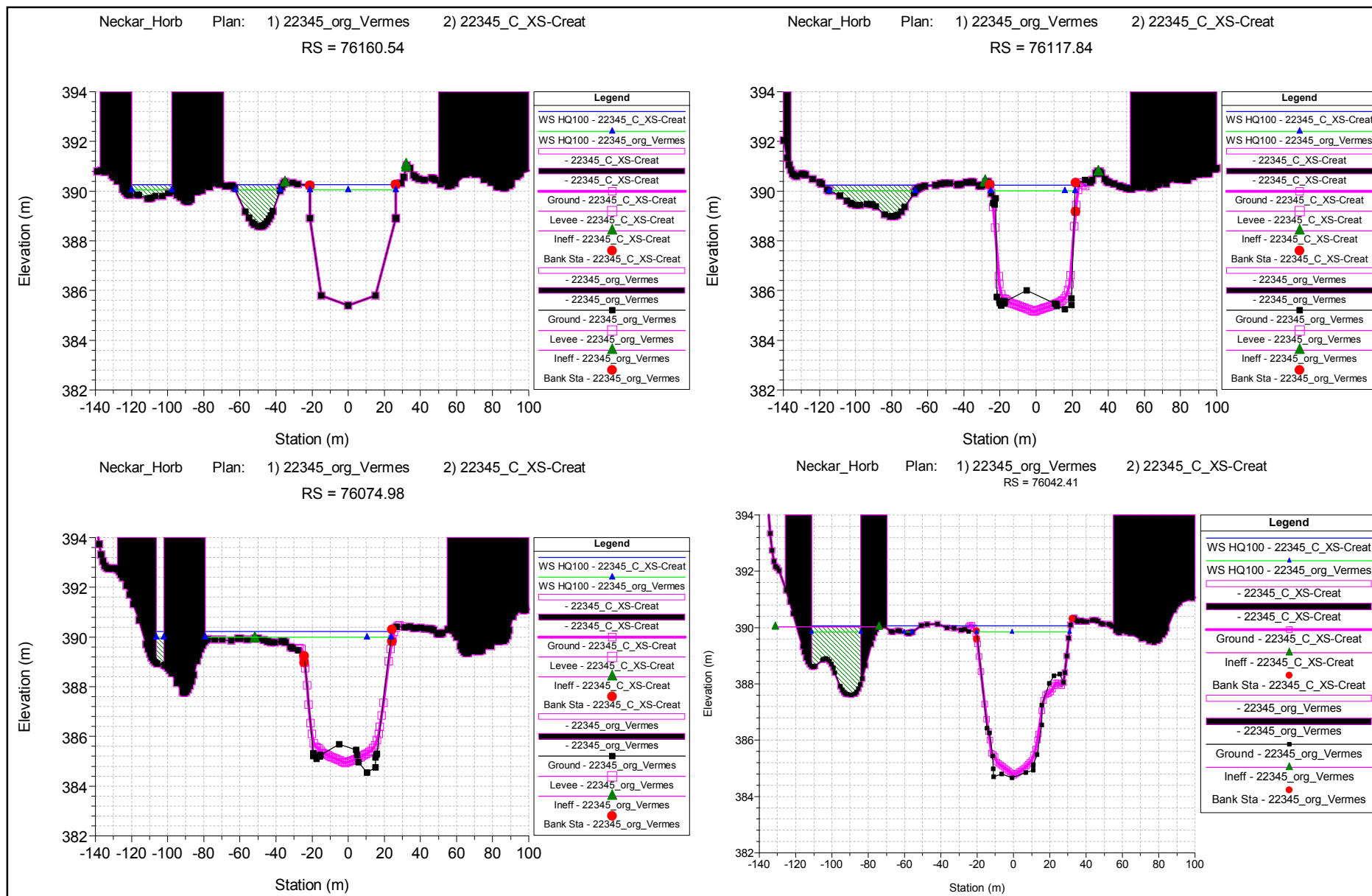
Anlage D.2.6 Neckar bei Horb: Querprofilgeometrienvergleich Referenzzustand/ Variante C mit Zusatzprofilen durch XS-Creator



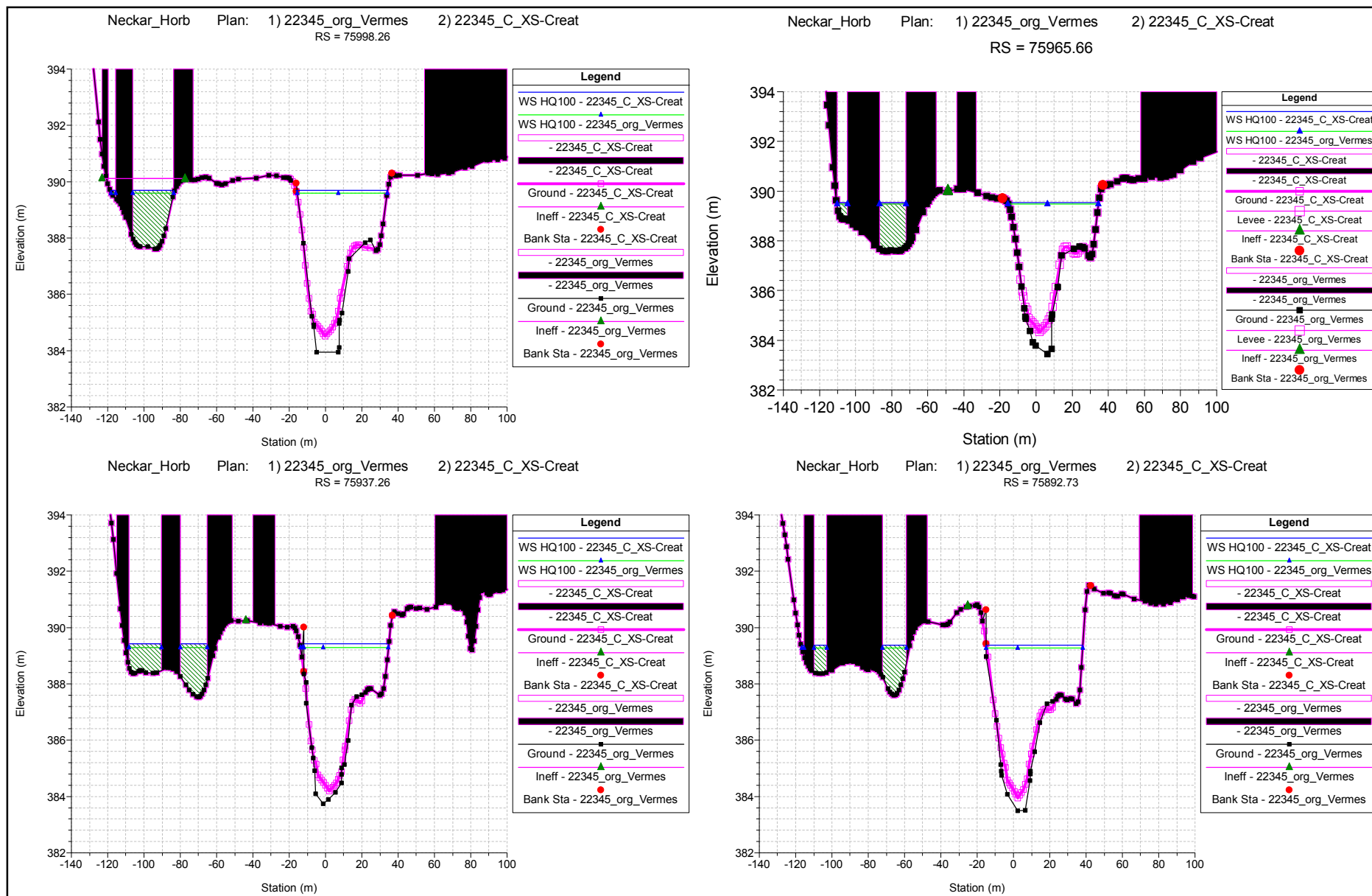
Anlage D.2.6 Neckar bei Horb: Querprofilgeometrienvergleich Referenzzustand/ Variante C mit Zusatzprofilen durch XS-Creator



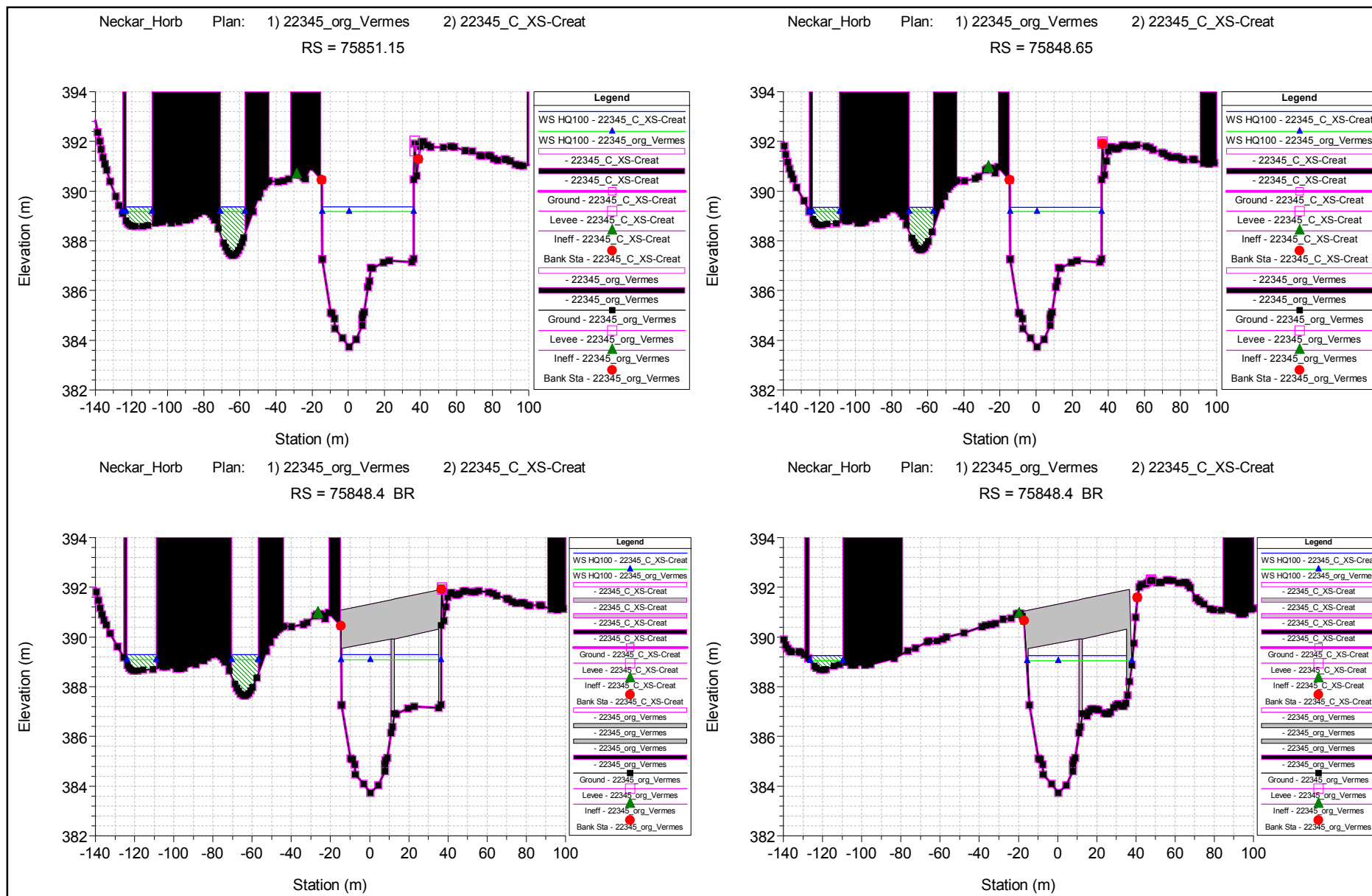
Anlage D.2.6 Neckar bei Horb: Querprofilgeometrienvergleich Referenzzustand/ Variante C mit Zusatzprofilen durch XS-Creator



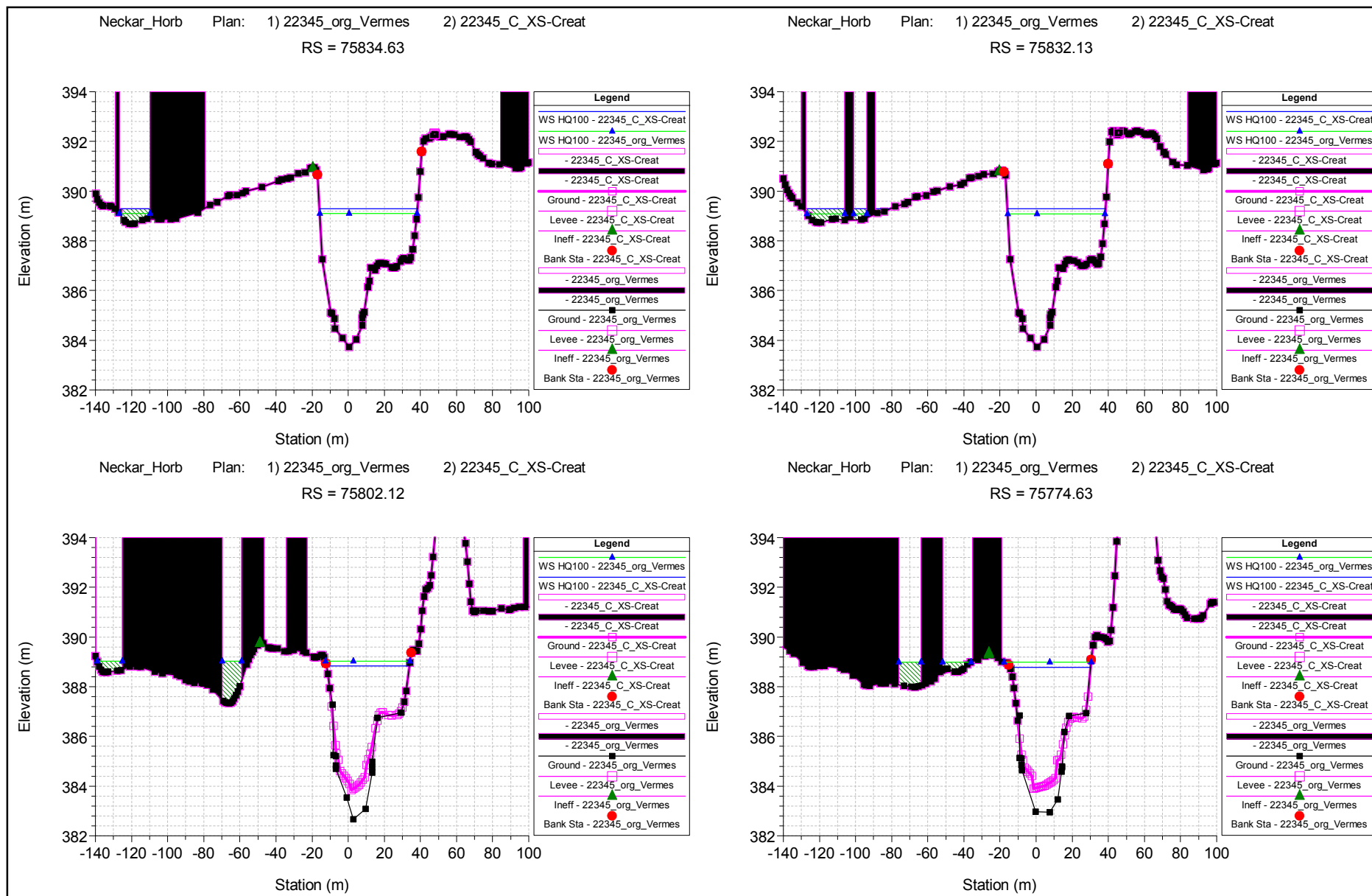
Anlage D.2.6 Neckar bei Horb: Querprofilgeometrienvergleich Referenzzustand/ Variante C mit Zusatzprofilen durch XS-Creator



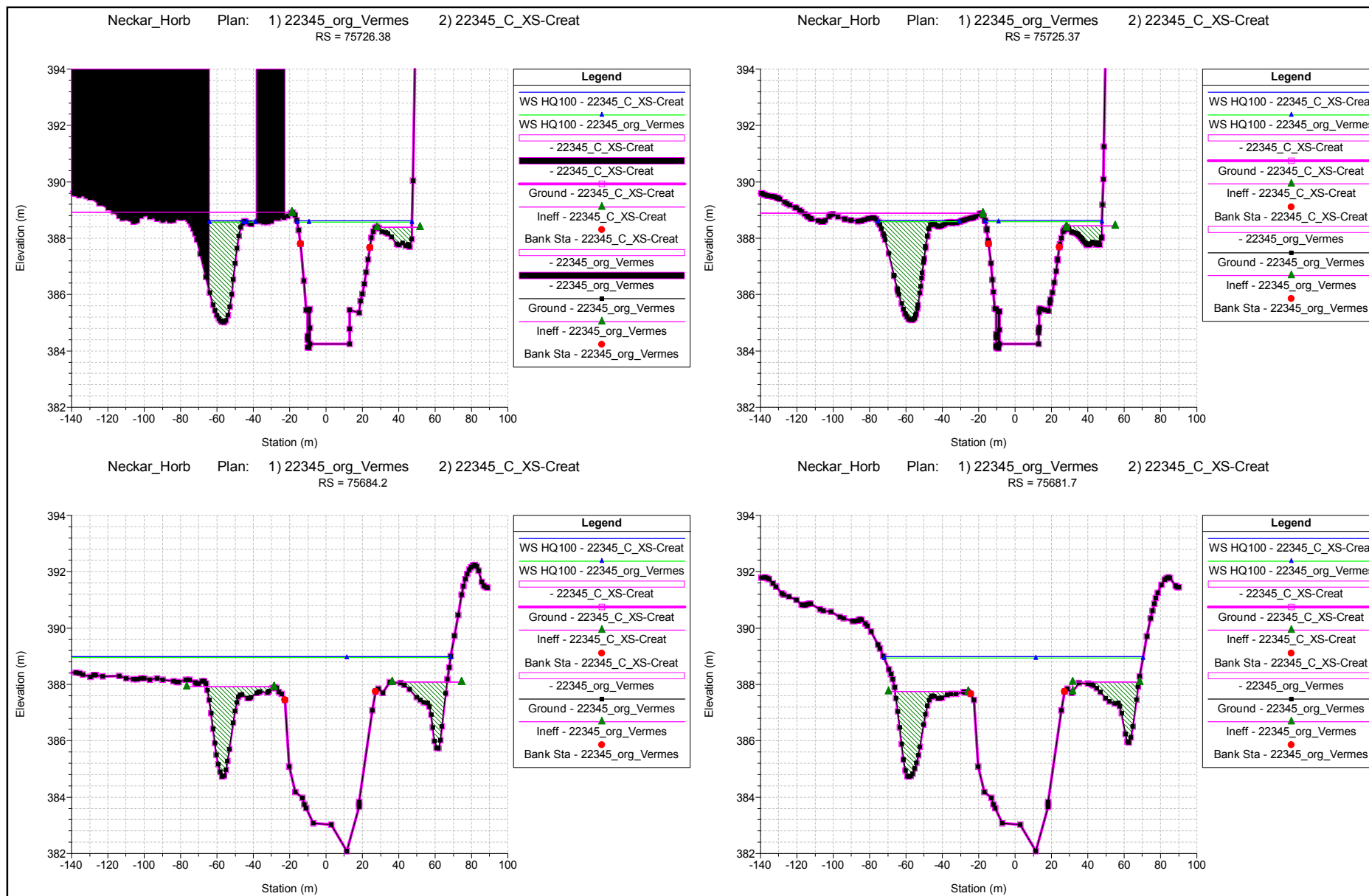
Anlage D.2.6 Neckar bei Horb: Querprofilgeometrienvergleich Referenzzustand/ Variante C mit Zusatzprofilen durch XS-Creator



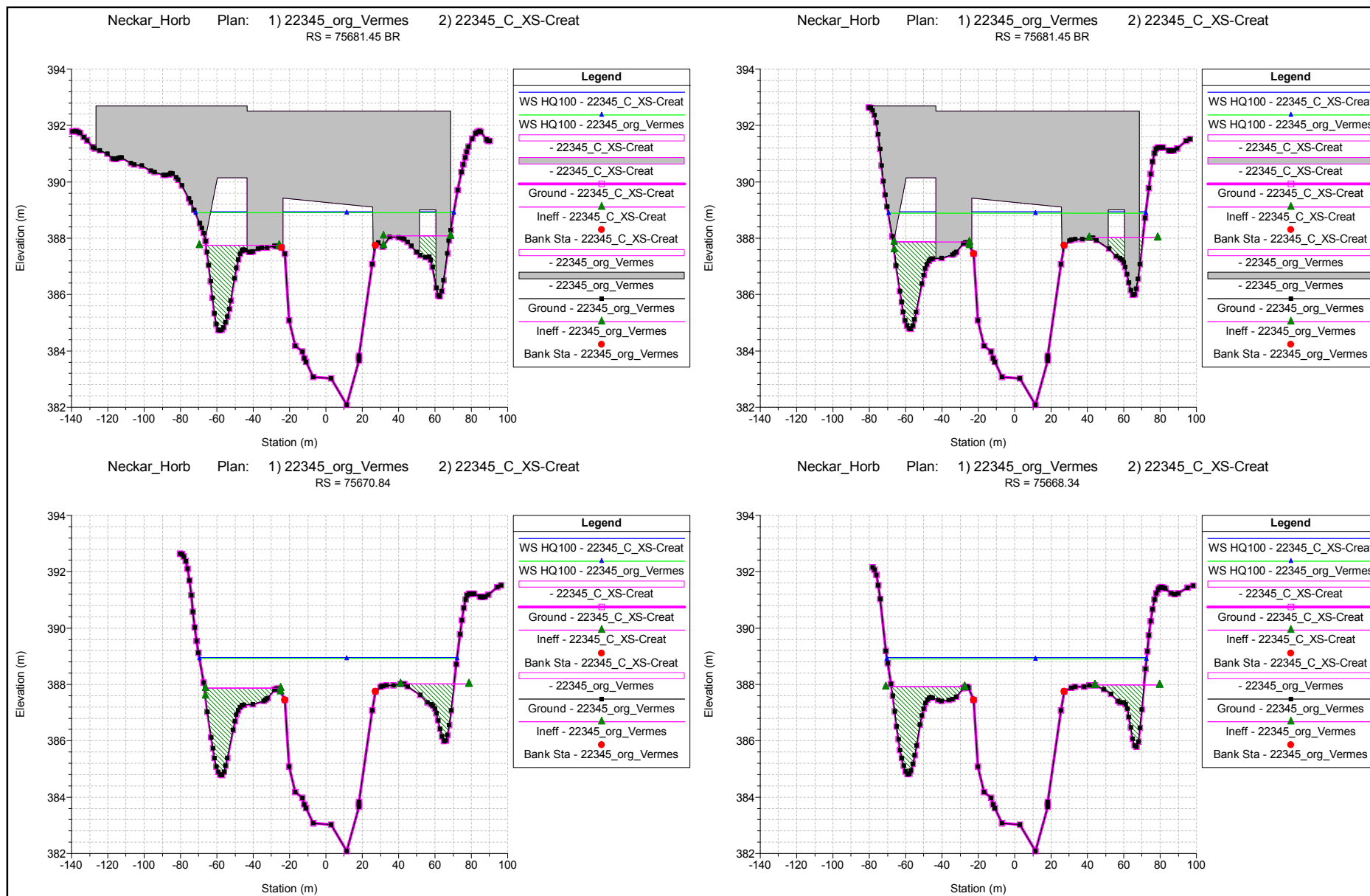
Anlage D.2.6 Neckar bei Horb: Querprofilgeometrienvergleich Referenzzustand/ Variante C mit Zusatzprofilen durch XS-Creator



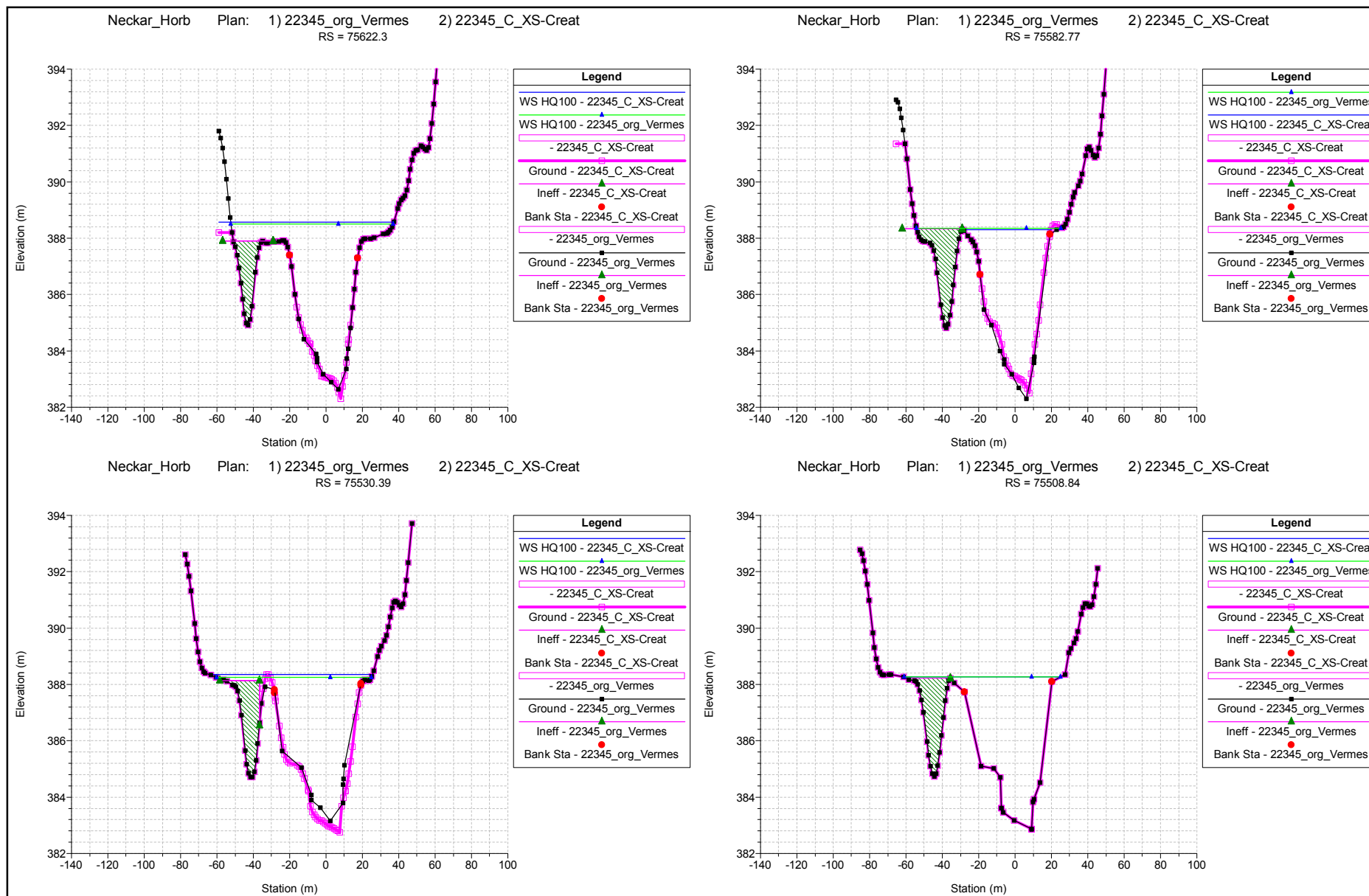
Anlage D.2.6 Neckar bei Horb: Querprofilgeometrienvergleich Referenzzustand/ Variante C mit Zusatzprofilen durch XS-Creator



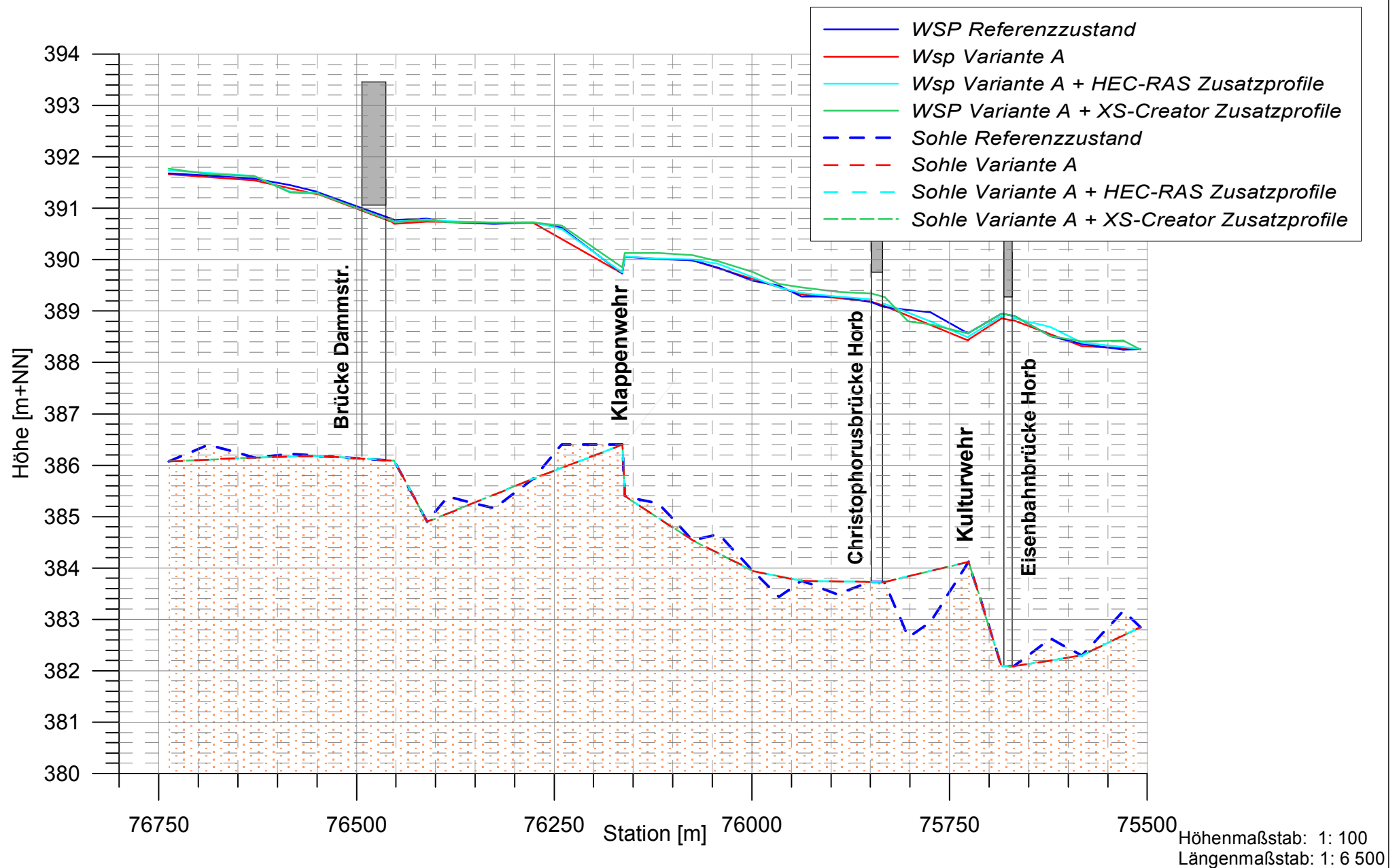
Anlage D.2.6 Neckar bei Horb: Querprofilgeometrienvergleich Referenzzustand/ Variante C mit Zusatzprofilen durch XS-Creator



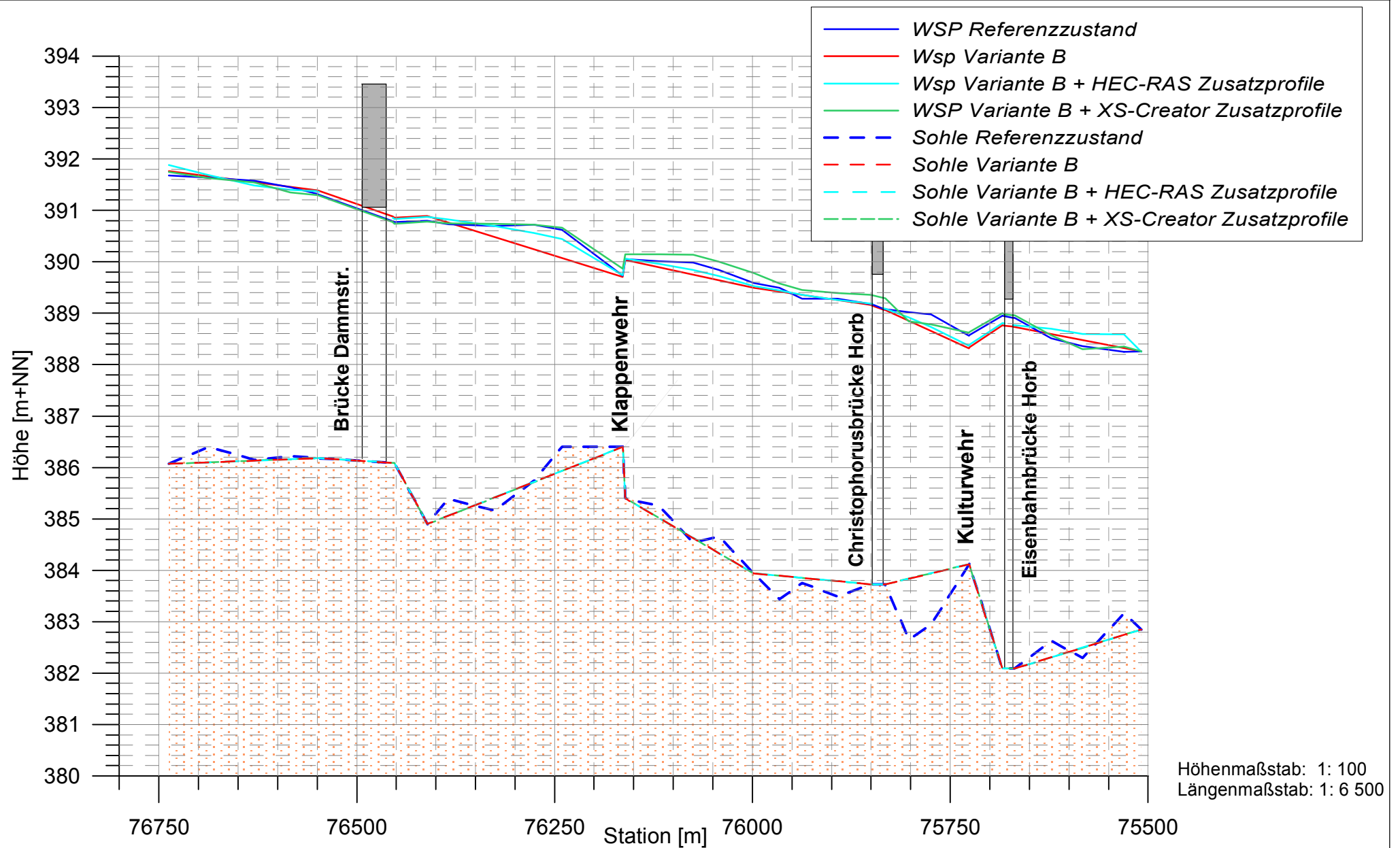
Anlage D.2.6 Neckar bei Horb: Querprofilgeometrienvergleich Referenzzustand/ Variante C mit Zusatzprofilen durch XS-Creator



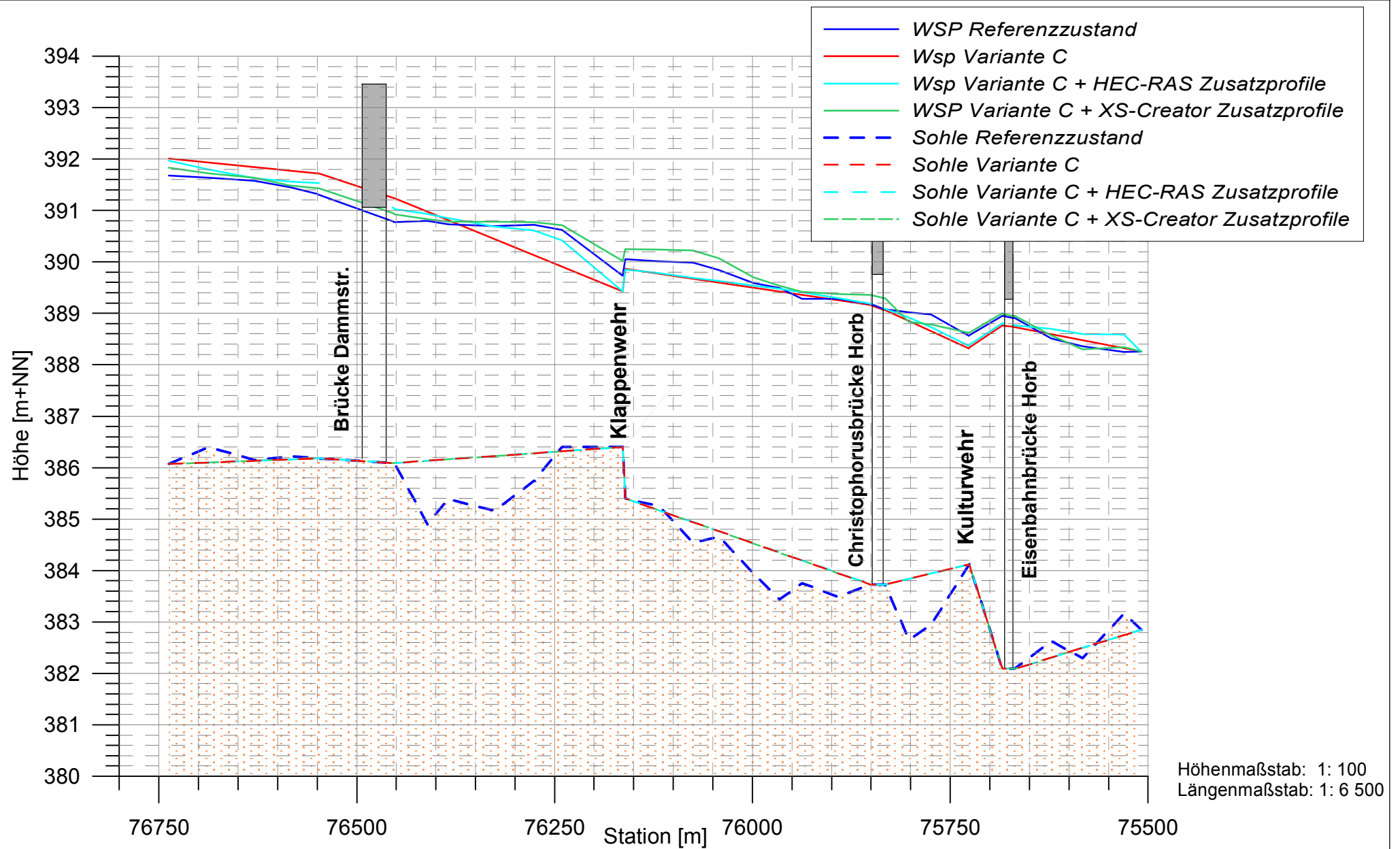
Anlage D.2.7 Neckar bei Horb: Wasserspiegellängsschnitt für Variante A



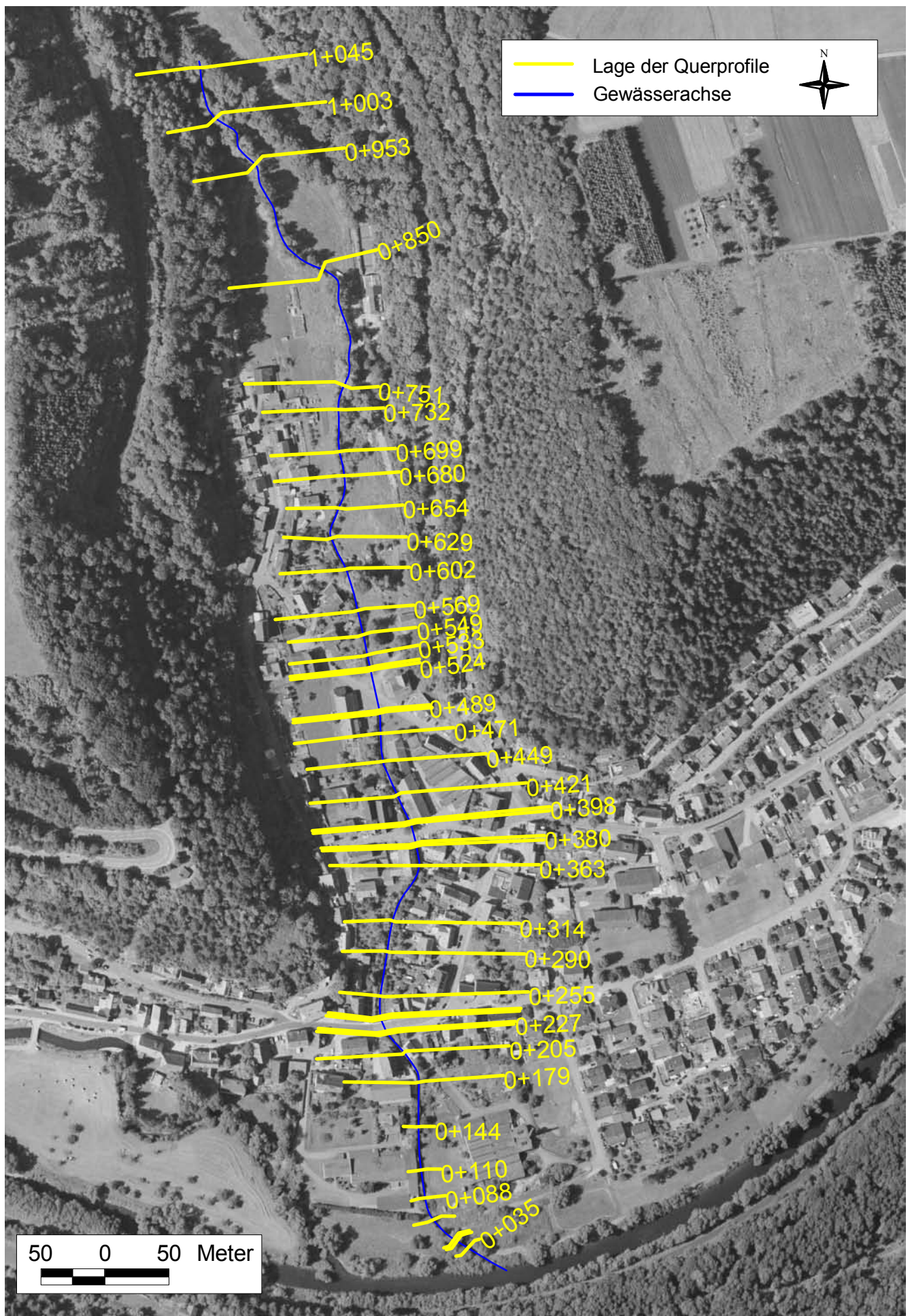
Anlage D.2.8 Neckar bei Horb: Wasserspiegellängsschnitt für Variante B



Anlage D.2.9 Neckar bei Horb: Wasserspiegellängsschnitt für Variante C



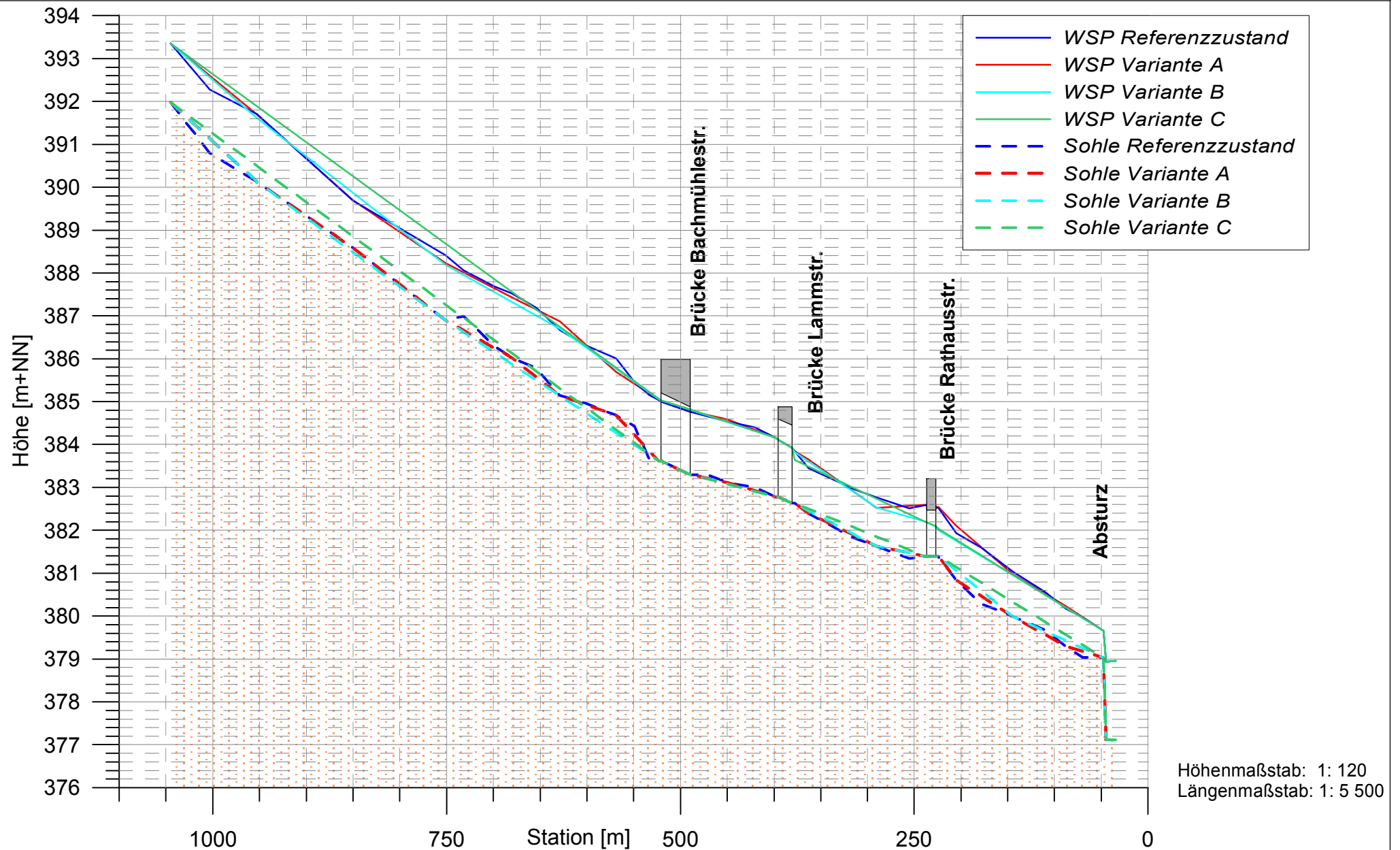
Anlage D.3.1 Talbach: Lage der Querprofile im Referenzzustand



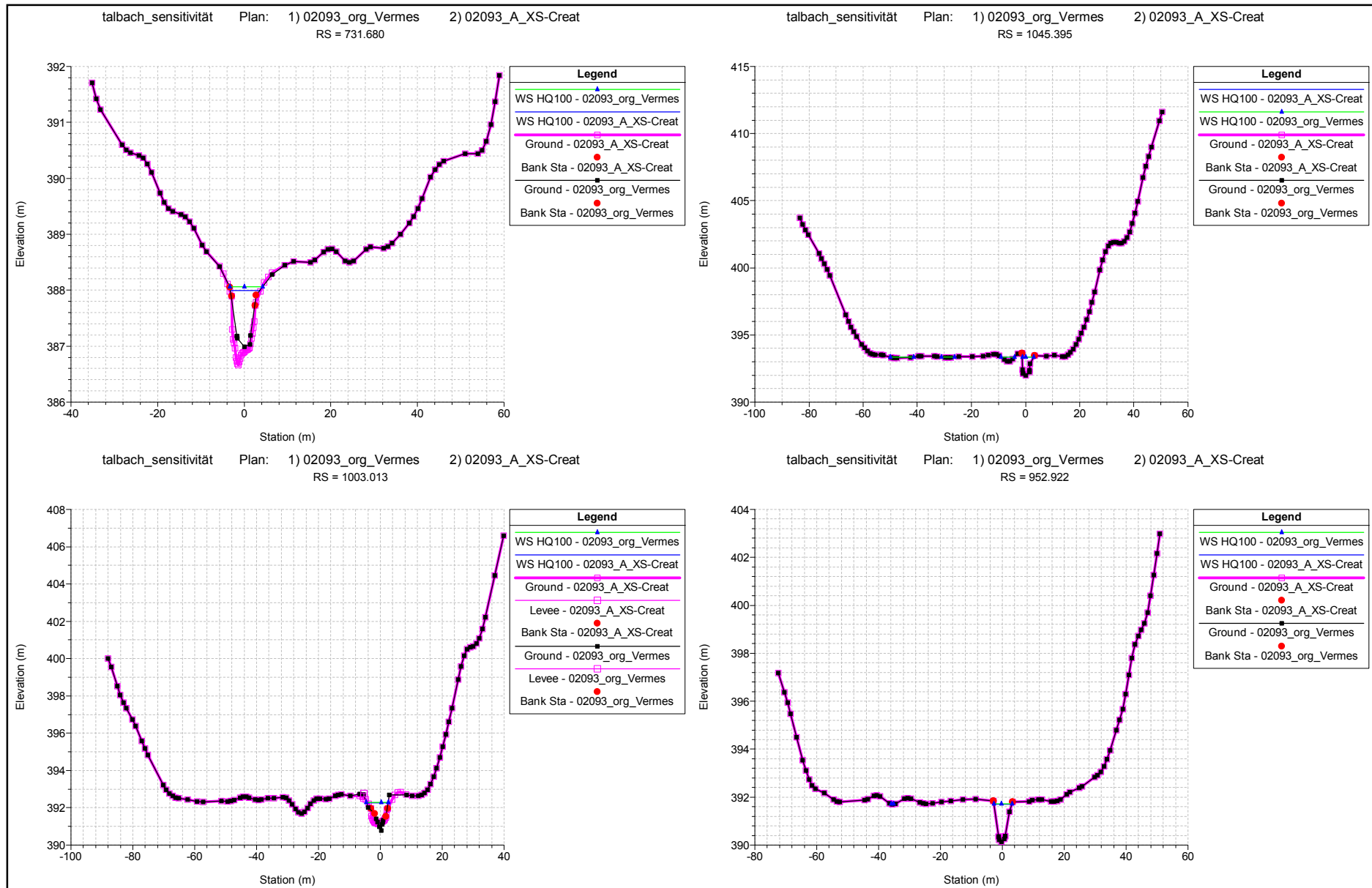
Anlage D.3.2 Talbach: Querprofile der Variante A, B, C

Referenzzustand	Variante A	Variante B	Variante C	Bemerkung
Stationierung [km]				
1+045	X	X	X	
1+003	-	-	-	
0+953	X	X	-	
0+850	X	-	-	
0+751	X	X	-	
0+732	-	-	-	
0+699	-	-	-	
0+680	X	-	-	
0+654	-	-	-	
0+629	X	X	-	
0+602	-	-	-	
0+569	X	-	-	
0+549	-	-	-	
0+533	-	-	-	
0+524	X	X	X	Brücke Bachmühlestr.
0+521	X	X	X	
0+489	X	X	X	
0+487	X	X	X	
0+471	-	-	-	
0+449	X	-	-	
0+421	-	-	-	
0+398	X	X	X	Brücke Lammstr.
0+396	X	X	X	
0+380	X	X	X	
0+378	X	X	X	
0+363	X	-	-	
0+314	-	-	-	
0+290	X	X	-	
0+255	-	-	-	
0+239	X	X	X	Brücke Rathausstr.
0+237	X	X	X	
0+227	X	X	X	
0+224	X	X	X	
0+205	X	-	-	
0+179	-	-	-	
0+144	X	X	-	
0+110	-	-	-	
0+088	X	-	-	
0+070	-	-	-	
0+048	X	X	X	Absturz
0+045	X	X	X	
0+035	X	X	X	
X = Profile wurden berücksichtigt - = Profile blieben unberücksichtigt				

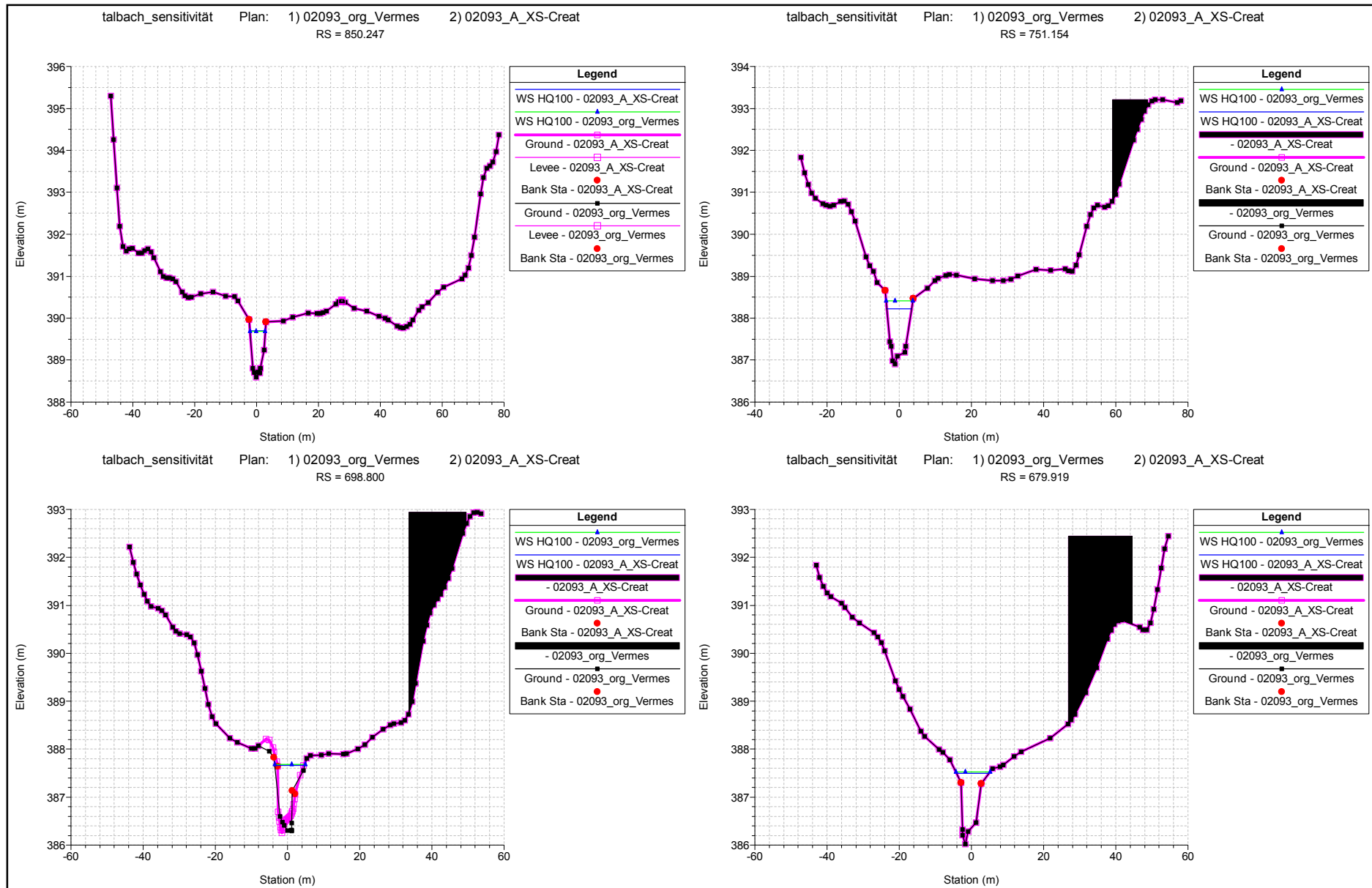
Anlage D.3.3 Talbach: Wasserspiegellängsschnitt für die Vermessungsvarianten A, B und C (ohne Zusatzprofile)



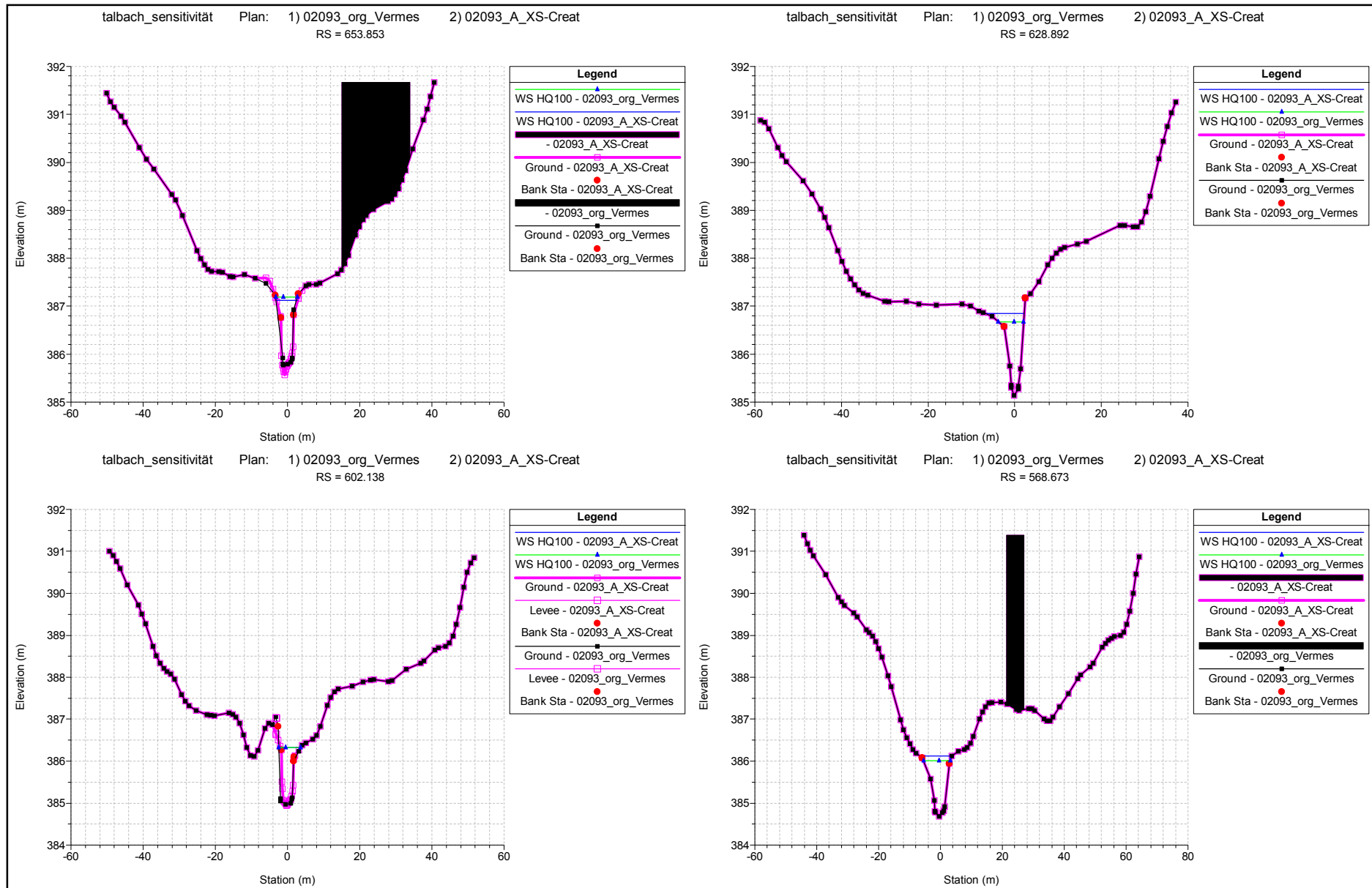
Anlage D.3.4 Talbach: Querprofilgeometrienvergleich Referenzzustand/ Variante A mit Zusatzprofilen durch XS-Creator



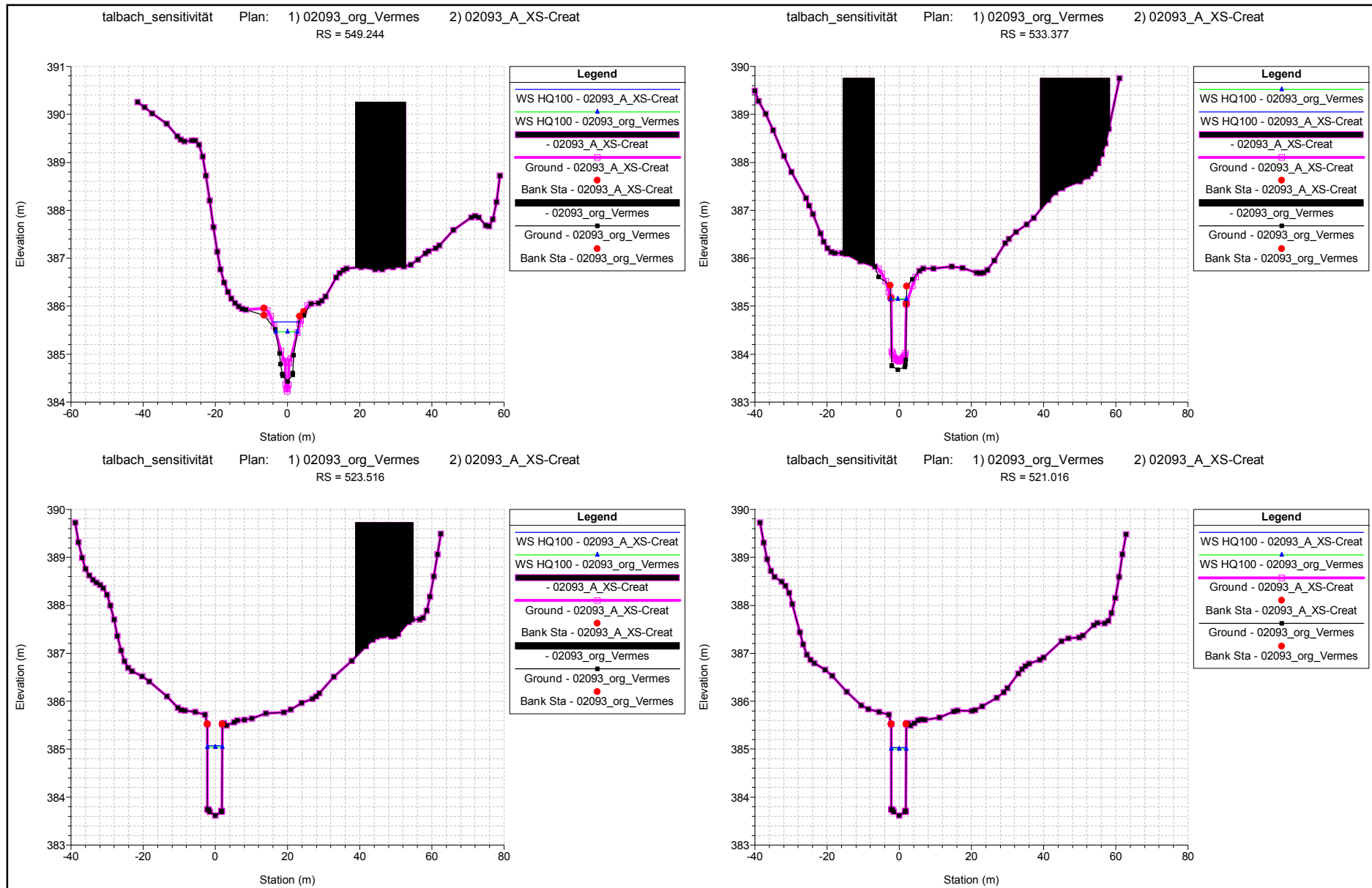
Anlage D.3.4 Talbach: Querprofilgeometrienvergleich Referenzzustand/ Variante A mit Zusatzprofilen durch XS-Creator



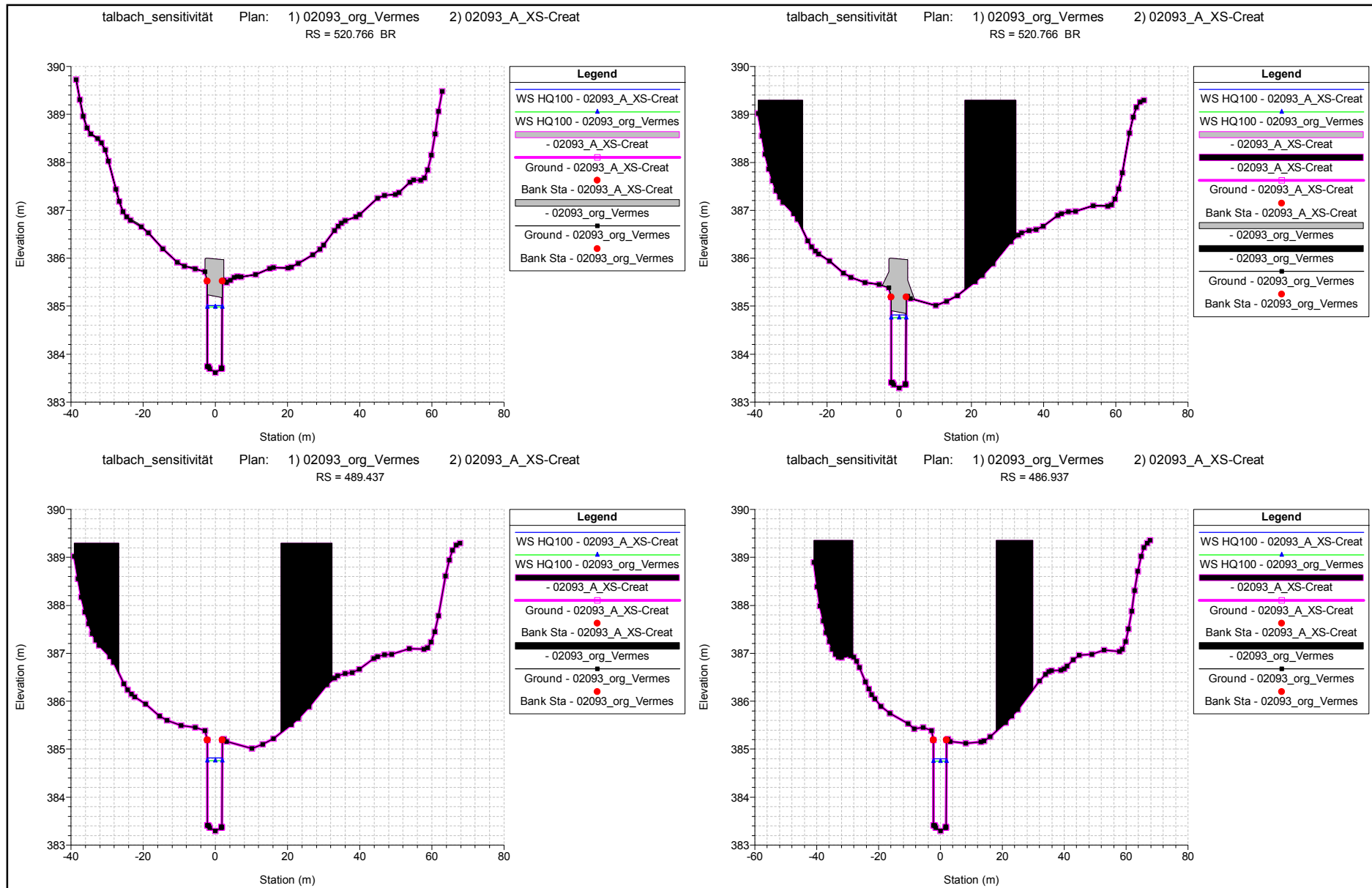
Anlage D.3.4 Talbach: Querprofilgeometrienvergleich Referenzzustand/ Variante A mit Zusatzprofilen durch XS-Creator



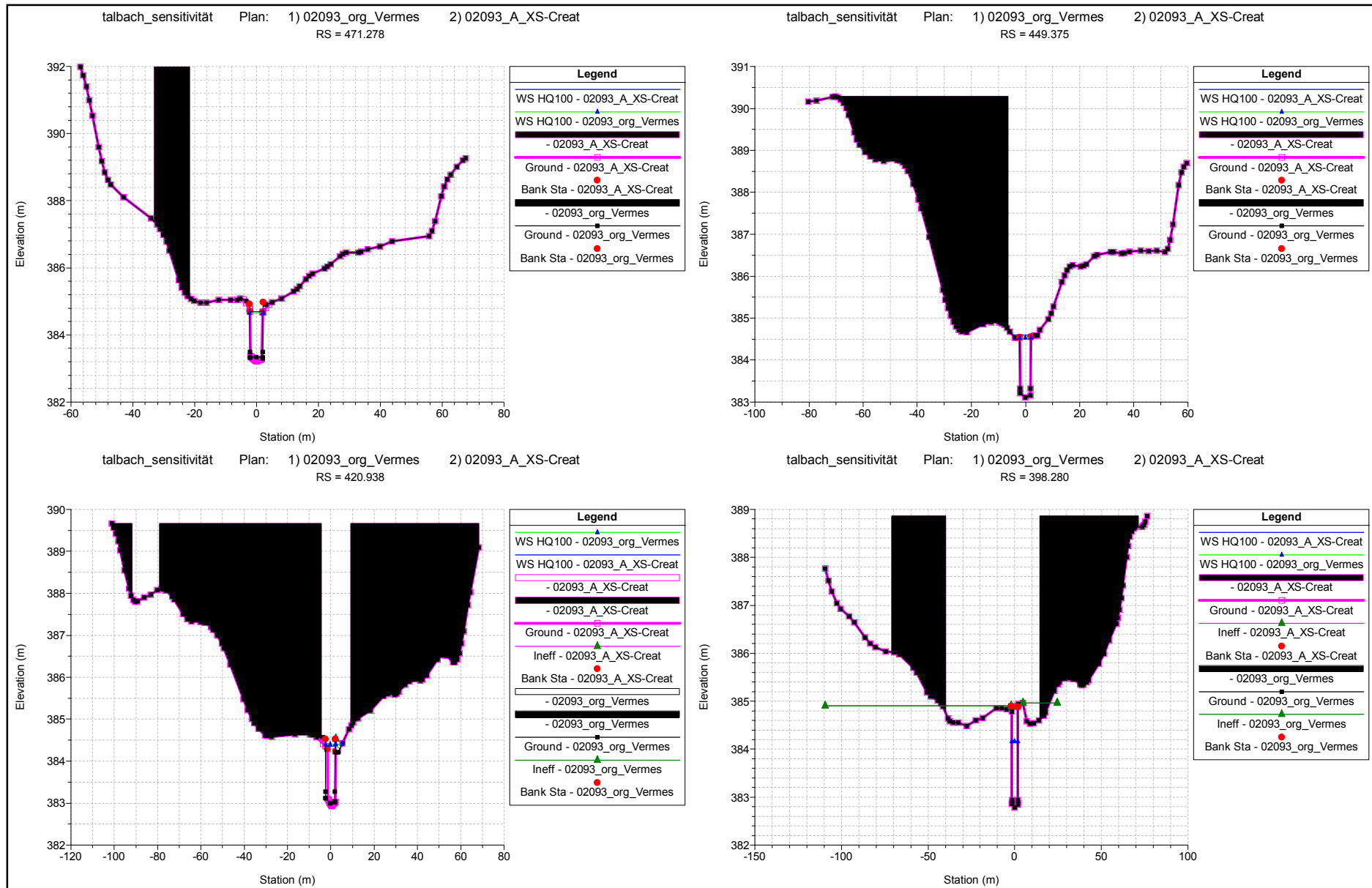
Anlage D.3.4 Talbach: Querprofilgeometrienvergleich Referenzzustand/ Variante A mit Zusatzprofilen durch XS-Creator



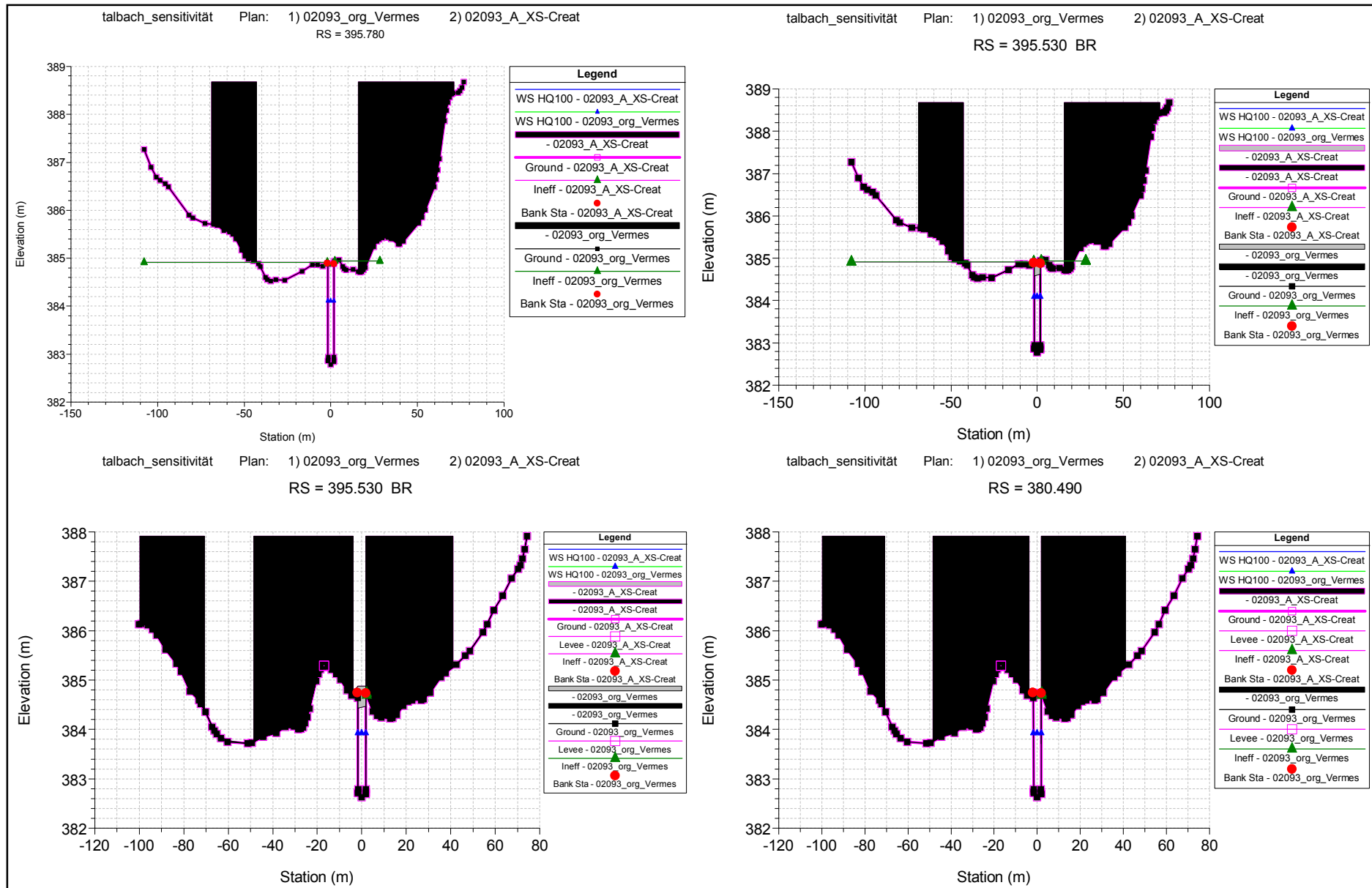
Anlage D.3.4 Talbach: Querprofilgeometrienvergleich Referenzzustand/ Variante A mit Zusatzprofilen durch XS-Creator



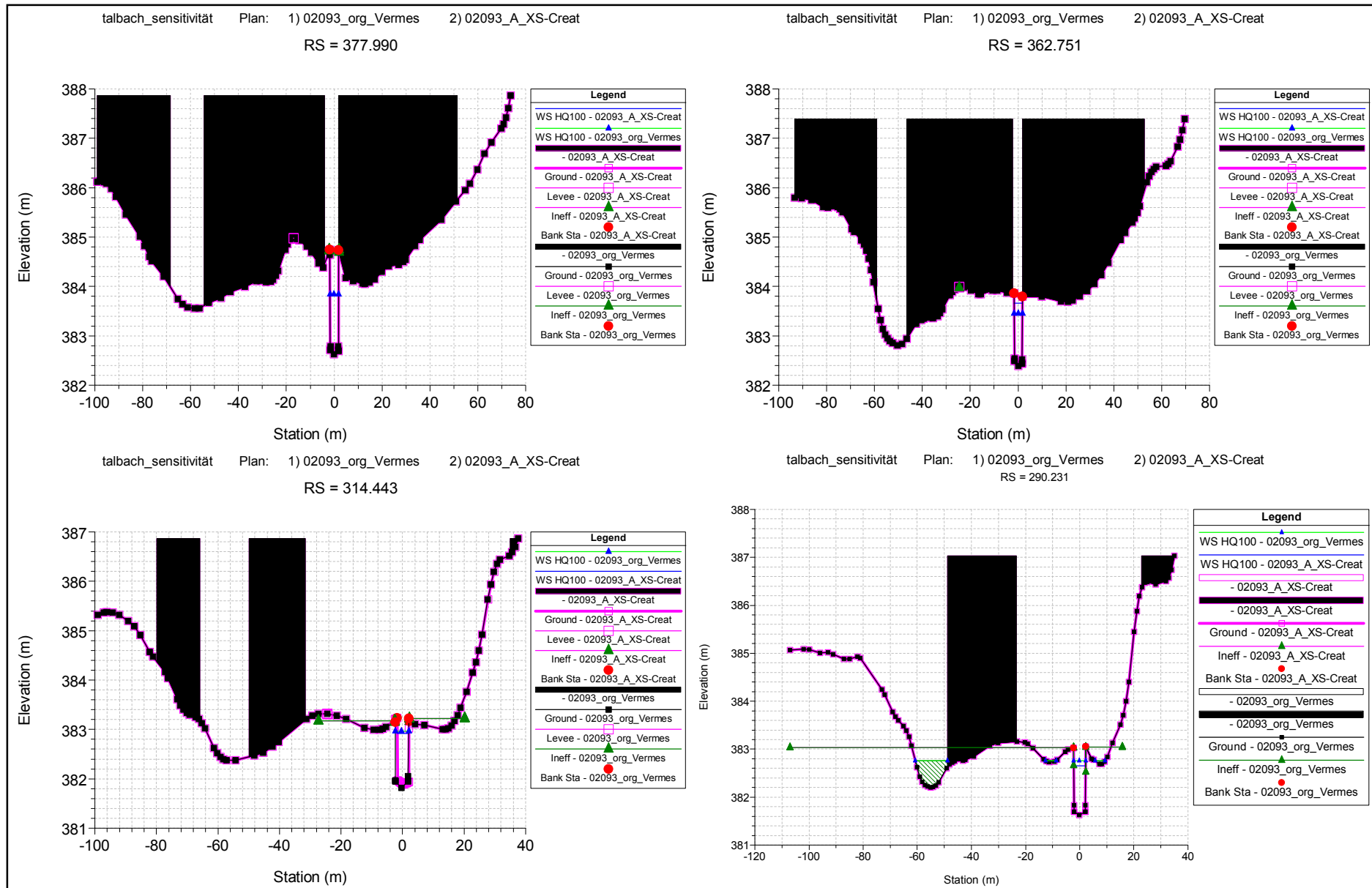
Anlage D.3.4 Talbach: Querprofilgeometrienvergleich Referenzzustand/ Variante A mit Zusatzprofilen durch XS-Creator



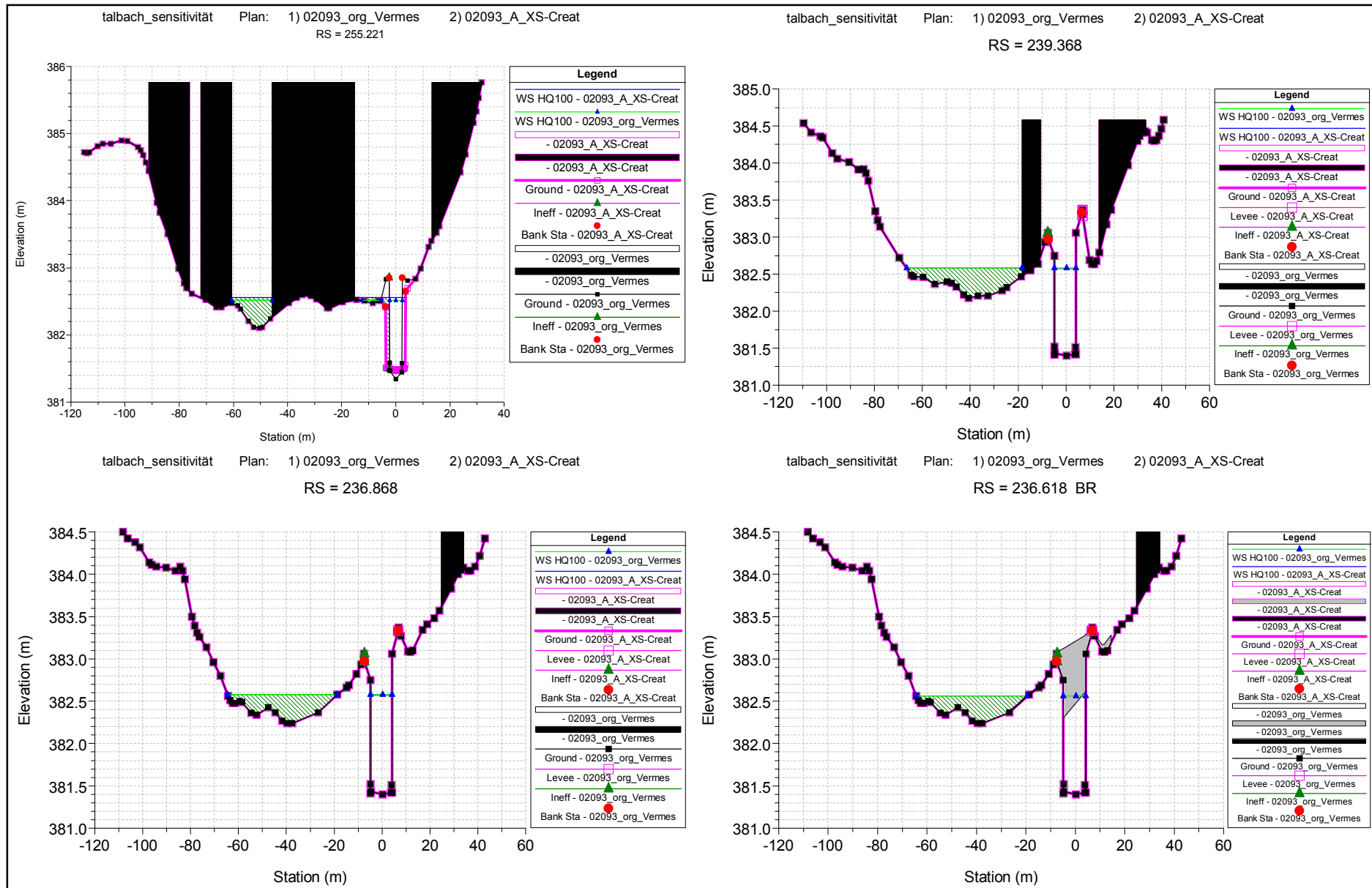
Anlage D.3.4 Talbach: Querprofilgeometrienvergleich Referenzzustand/ Variante A mit Zusatzprofilen durch XS-Creator



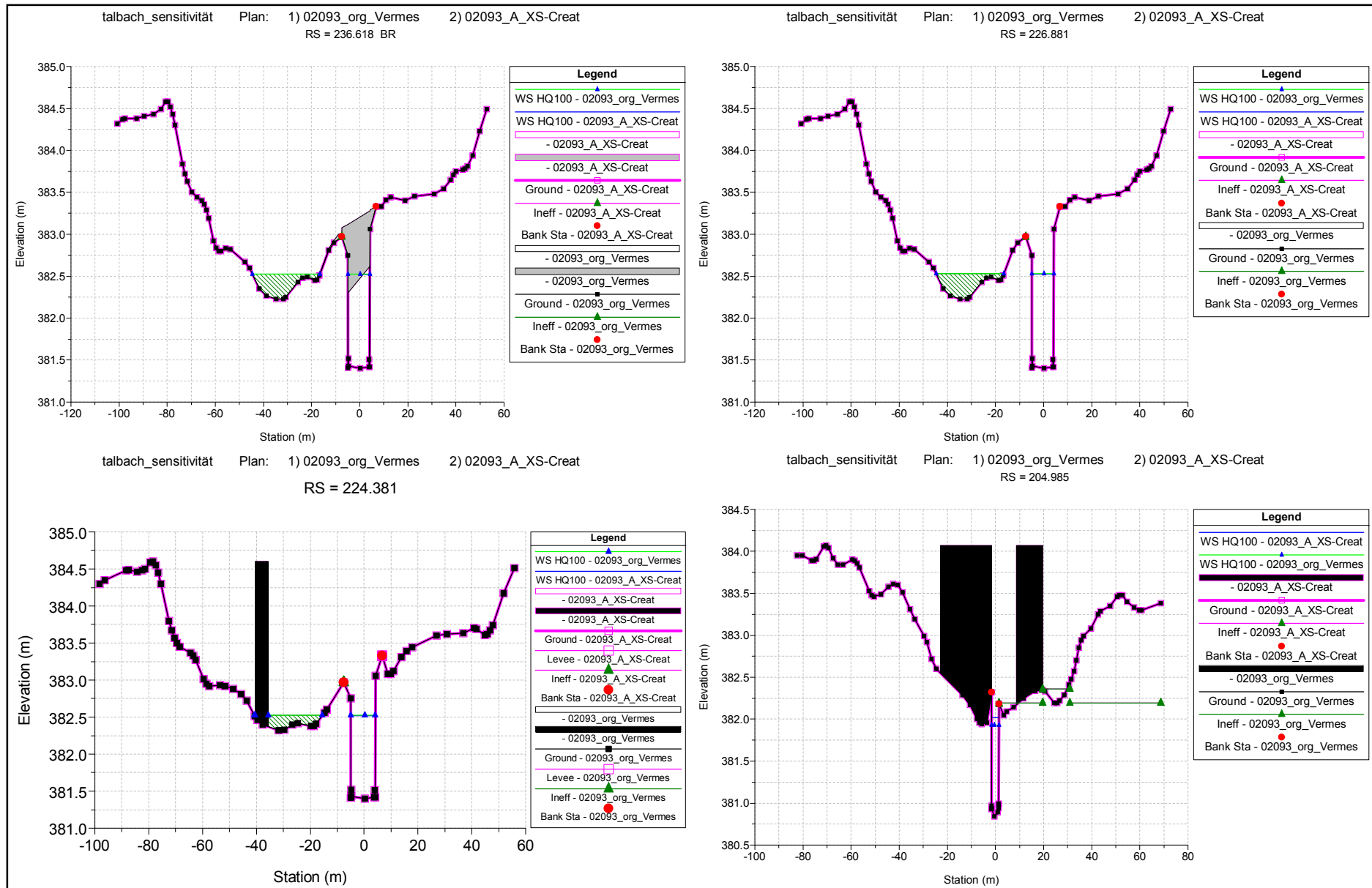
Anlage D.3.4 Talbach: Querprofilgeometrienvergleich Referenzzustand/ Variante A mit Zusatzprofilen durch XS-Creator



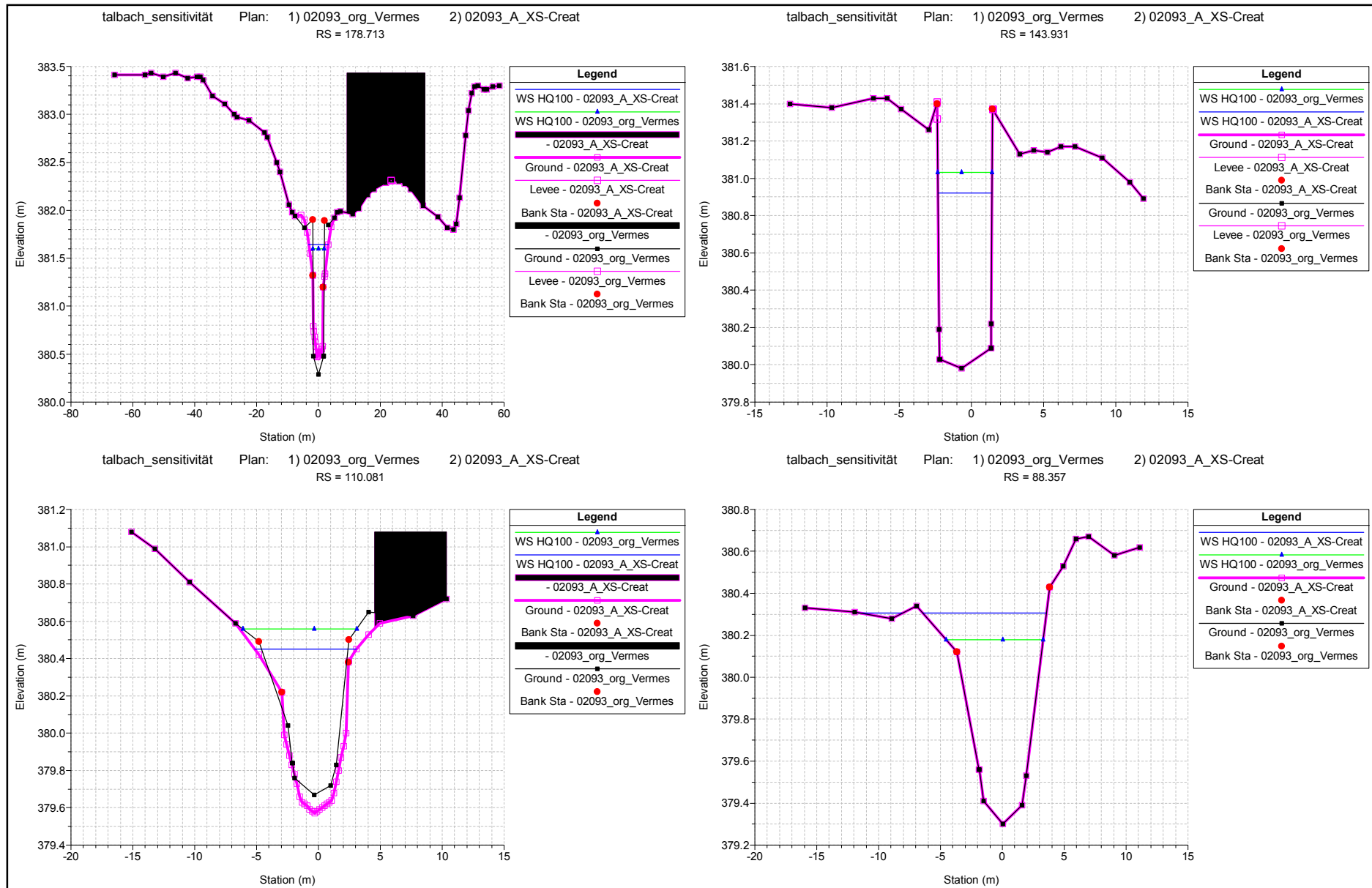
Anlage D.3.4 Talbach: Querprofilgeometrienvergleich Referenzzustand/ Variante A mit Zusatzprofilen durch XS-Creator



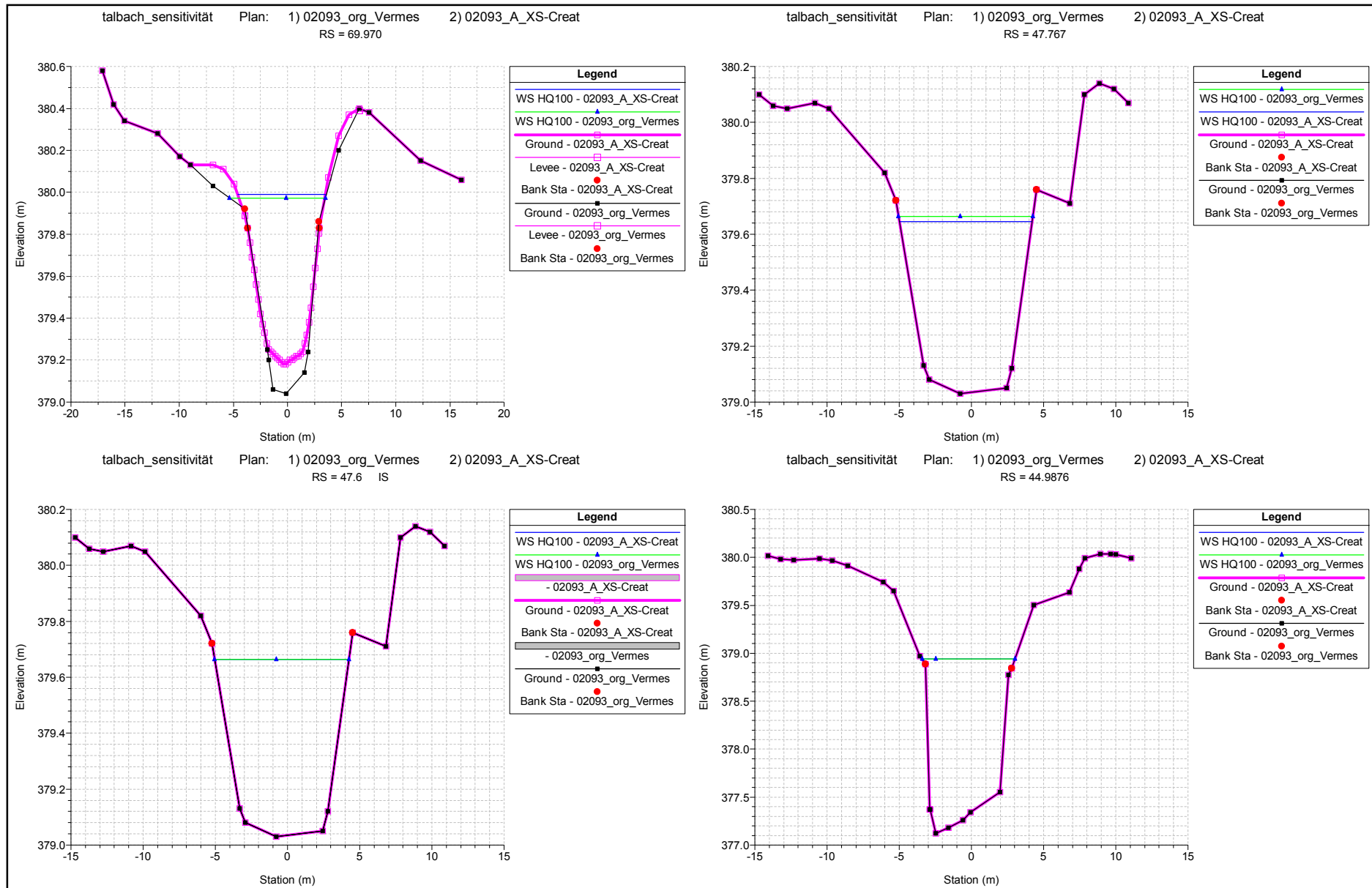
Anlage D.3.4 Talbach: Querprofilgeometrienvergleich Referenzzustand/ Variante A mit Zusatzprofilen durch XS-Creator



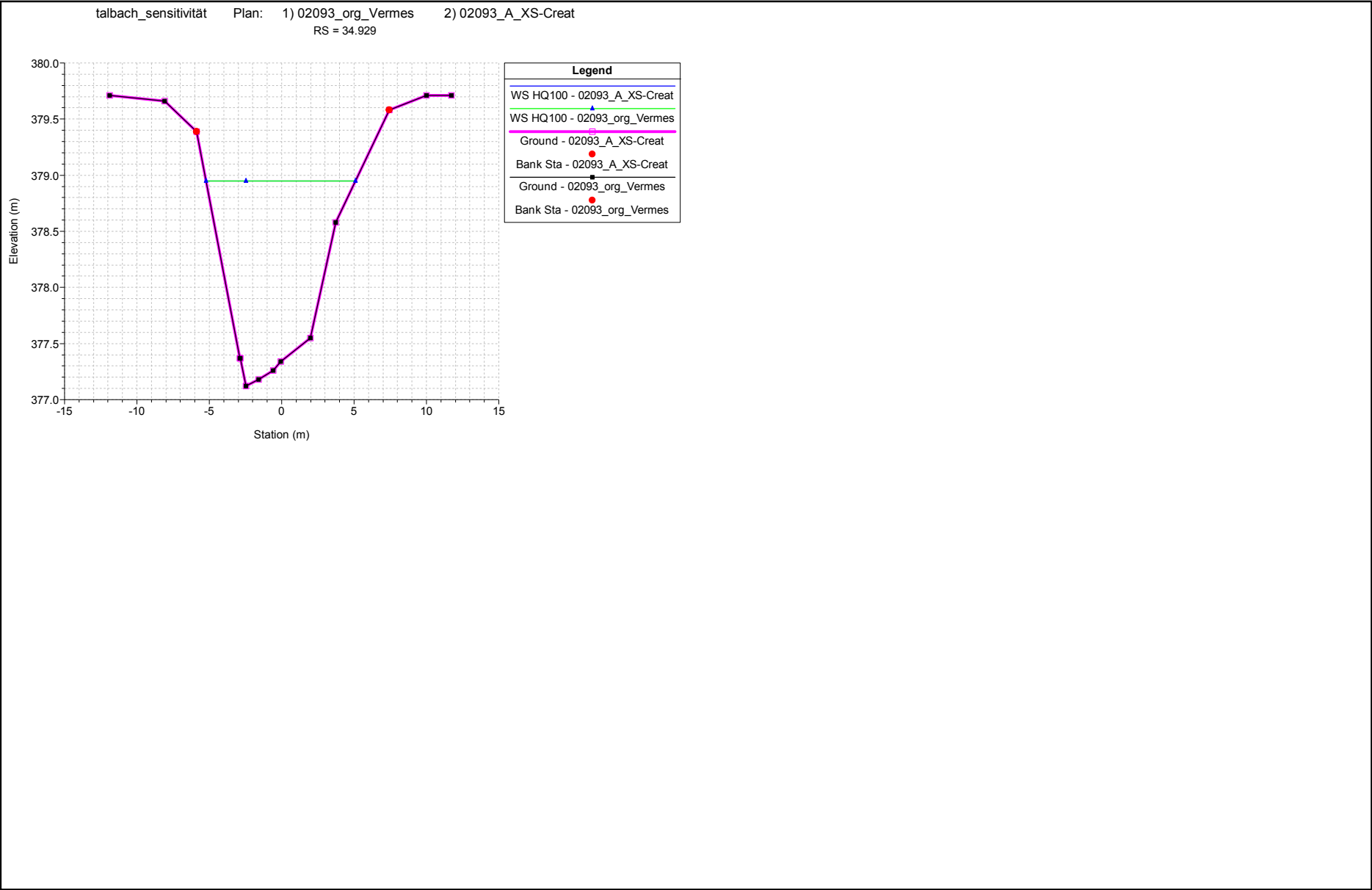
Anlage D.3.4 Talbach: Querprofilgeometrienvergleich Referenzzustand/ Variante A mit Zusatzprofilen durch XS-Creator



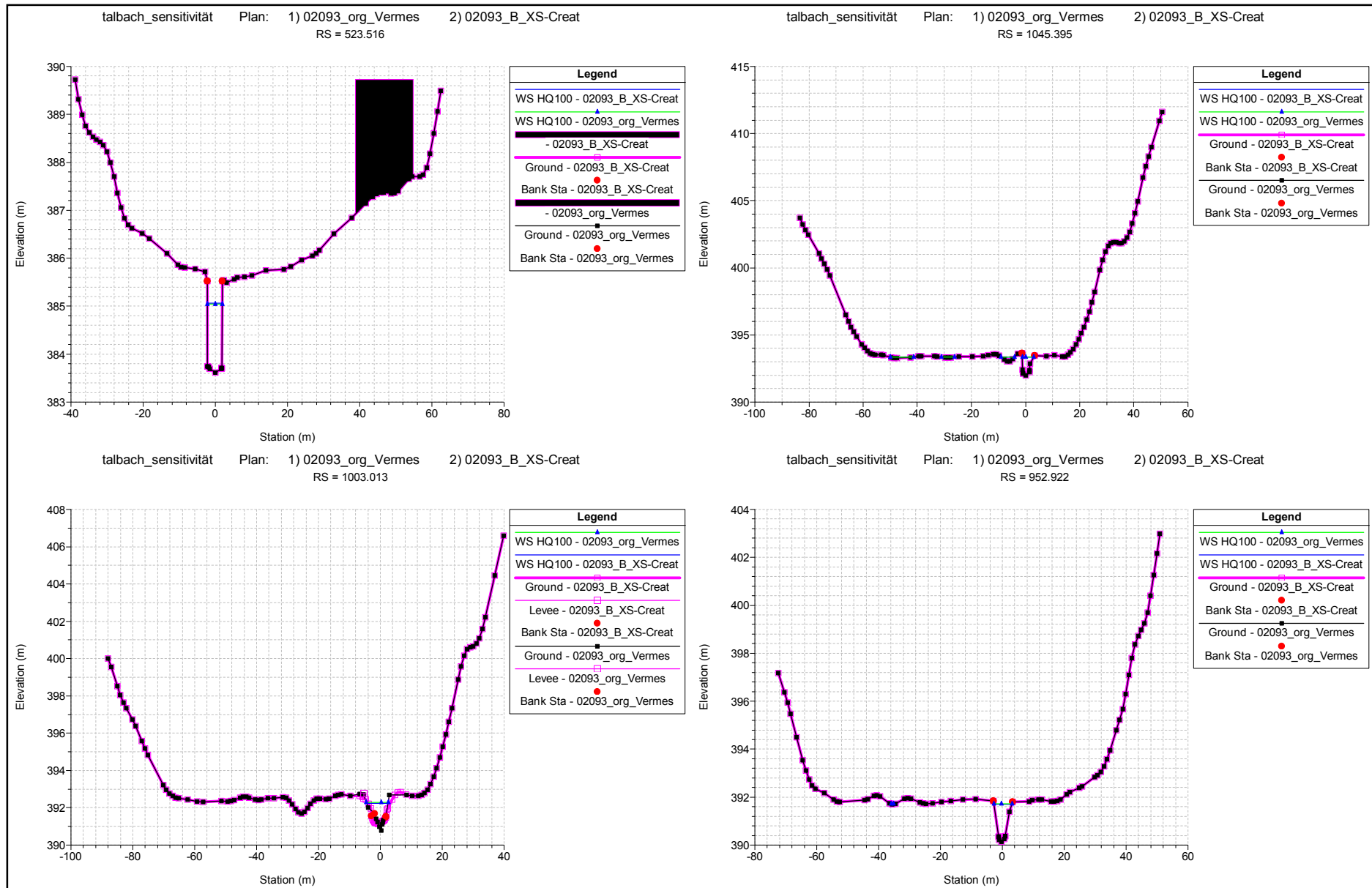
Anlage D.3.4 Talbach: Querprofilgeometrienvergleich Referenzzustand/ Variante A mit Zusatzprofilen durch XS-Creator



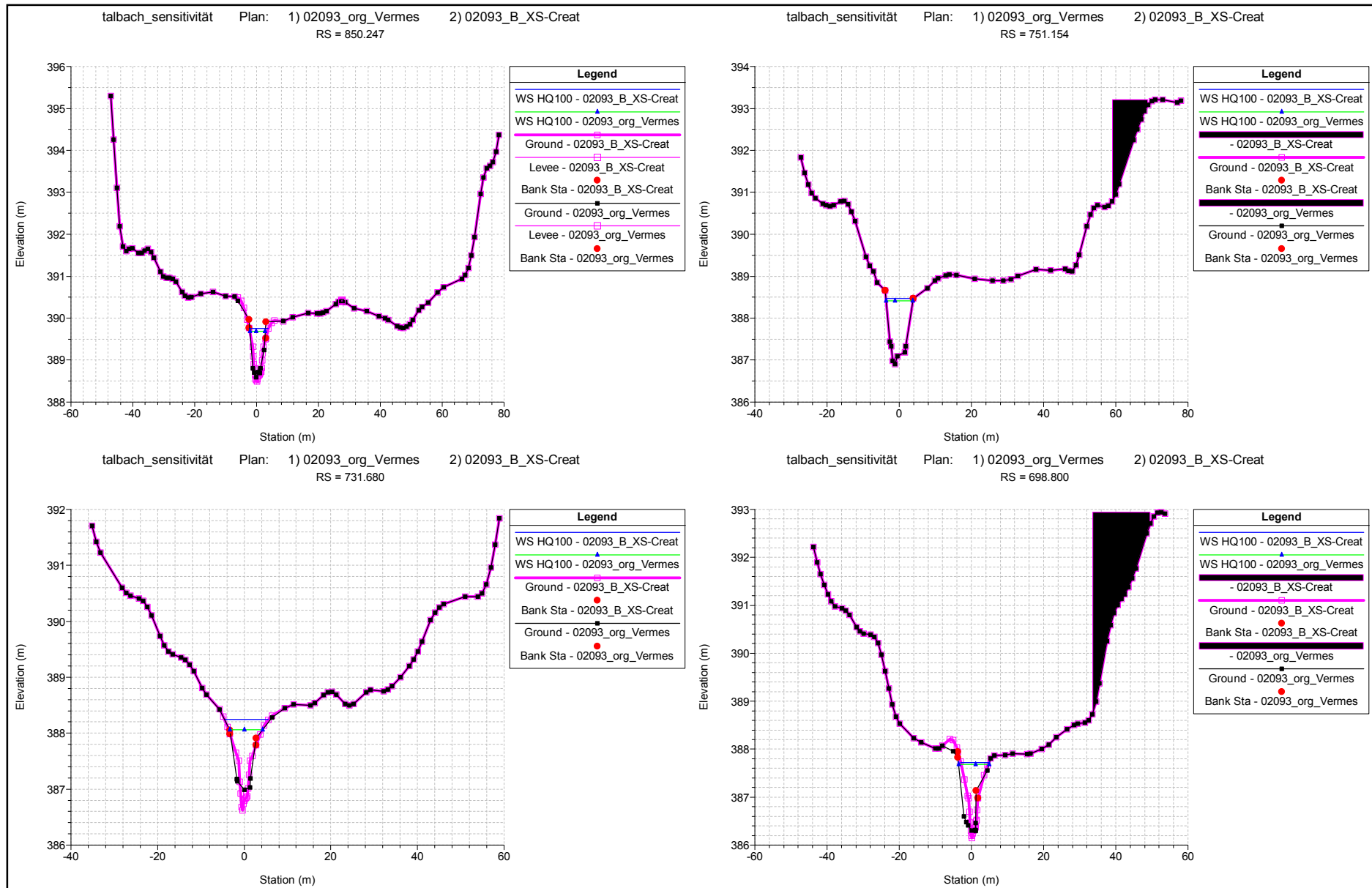
Anlage D.3.4 Talbach: Querprofilgeometrienvergleich Referenzzustand/ Variante A mit Zusatzprofilen durch XS-Creator



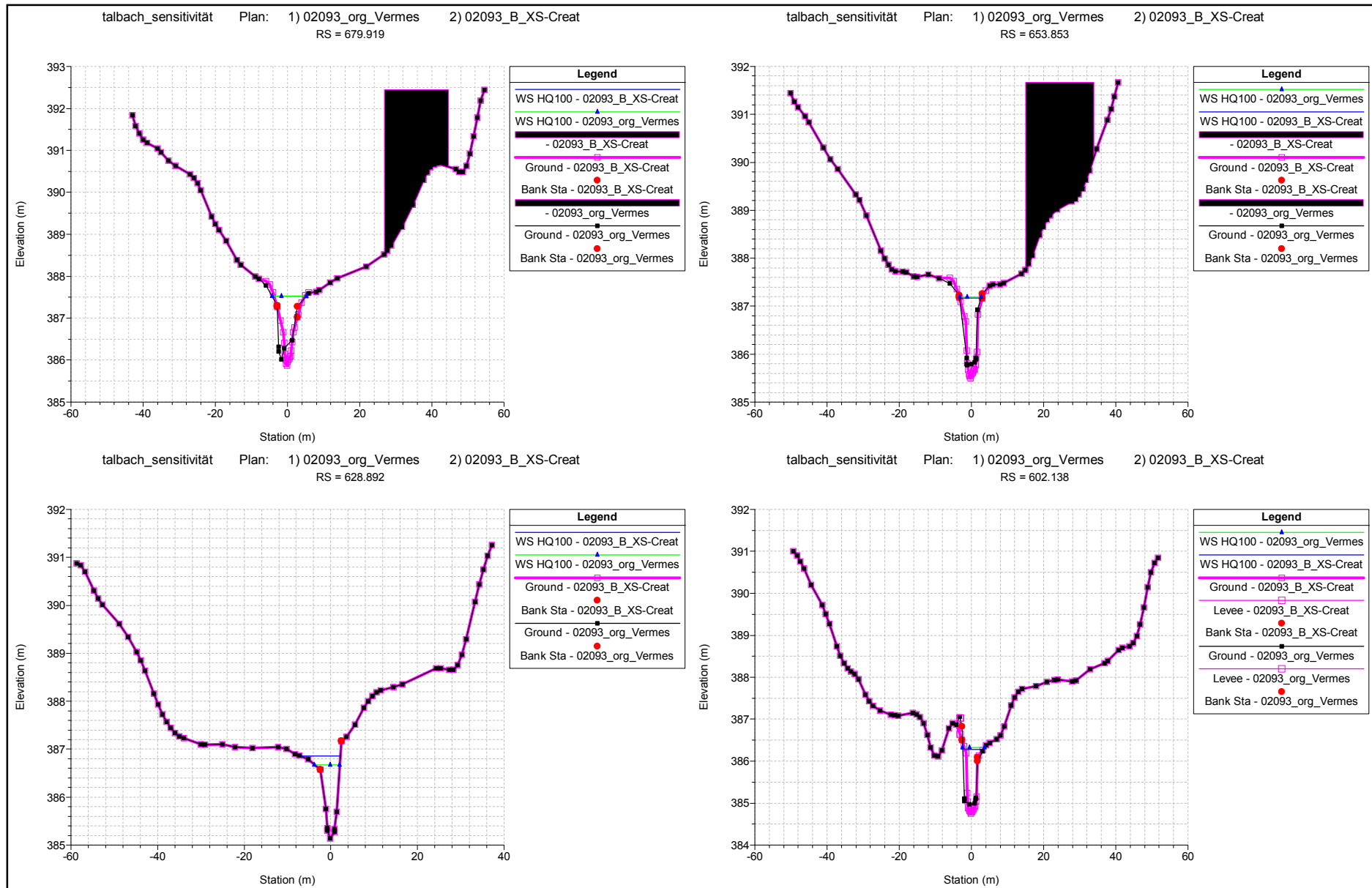
Anlage D.3.5 Talbach: Querprofilgeometrienvergleich Referenzzustand/ Variante B mit Zusatzprofilen durch XS-Creator



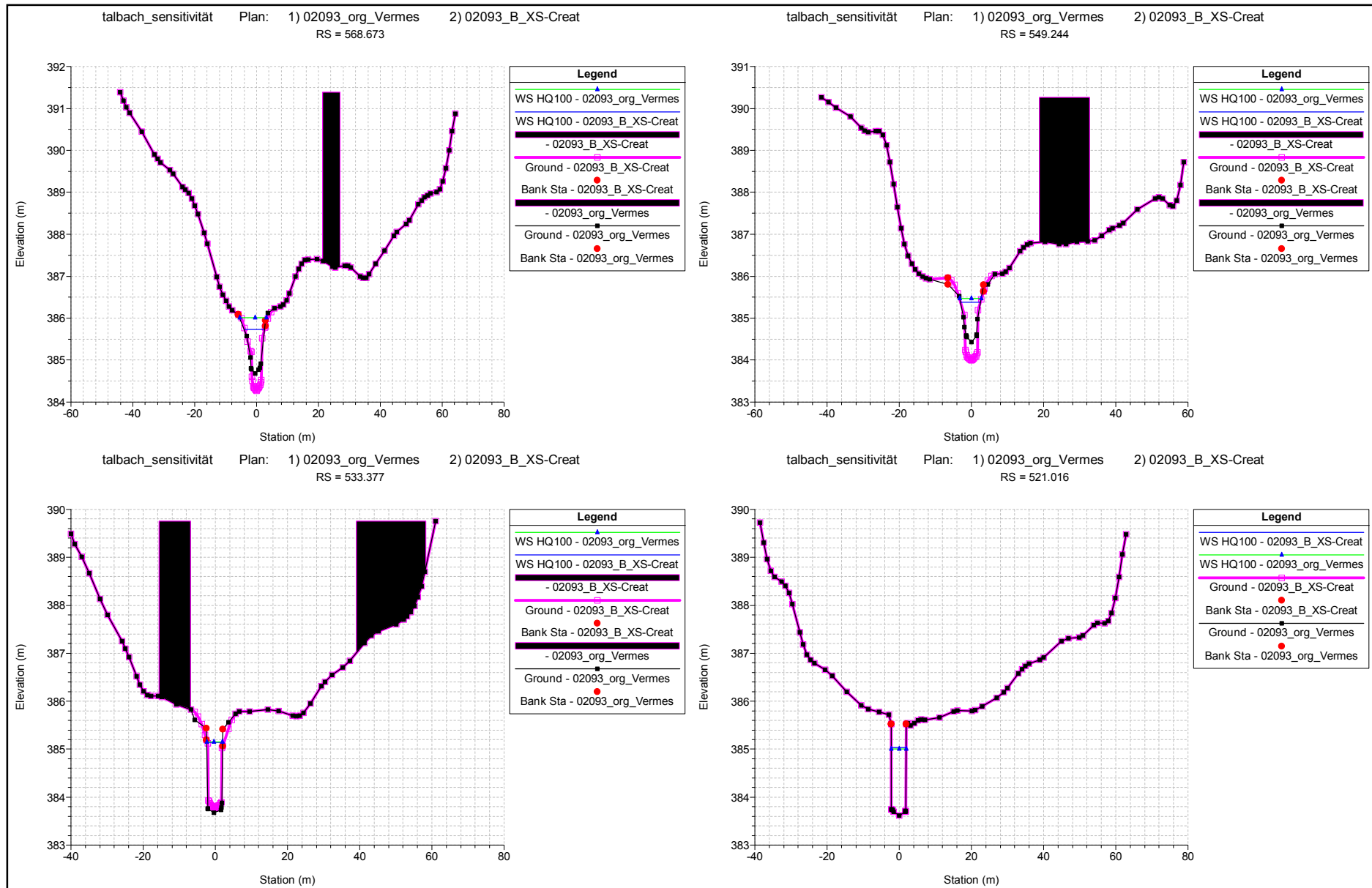
Anlage D.3.5 Talbach: Querprofilgeometrienvergleich Referenzzustand/ Variante B mit Zusatzprofilen durch XS-Creator



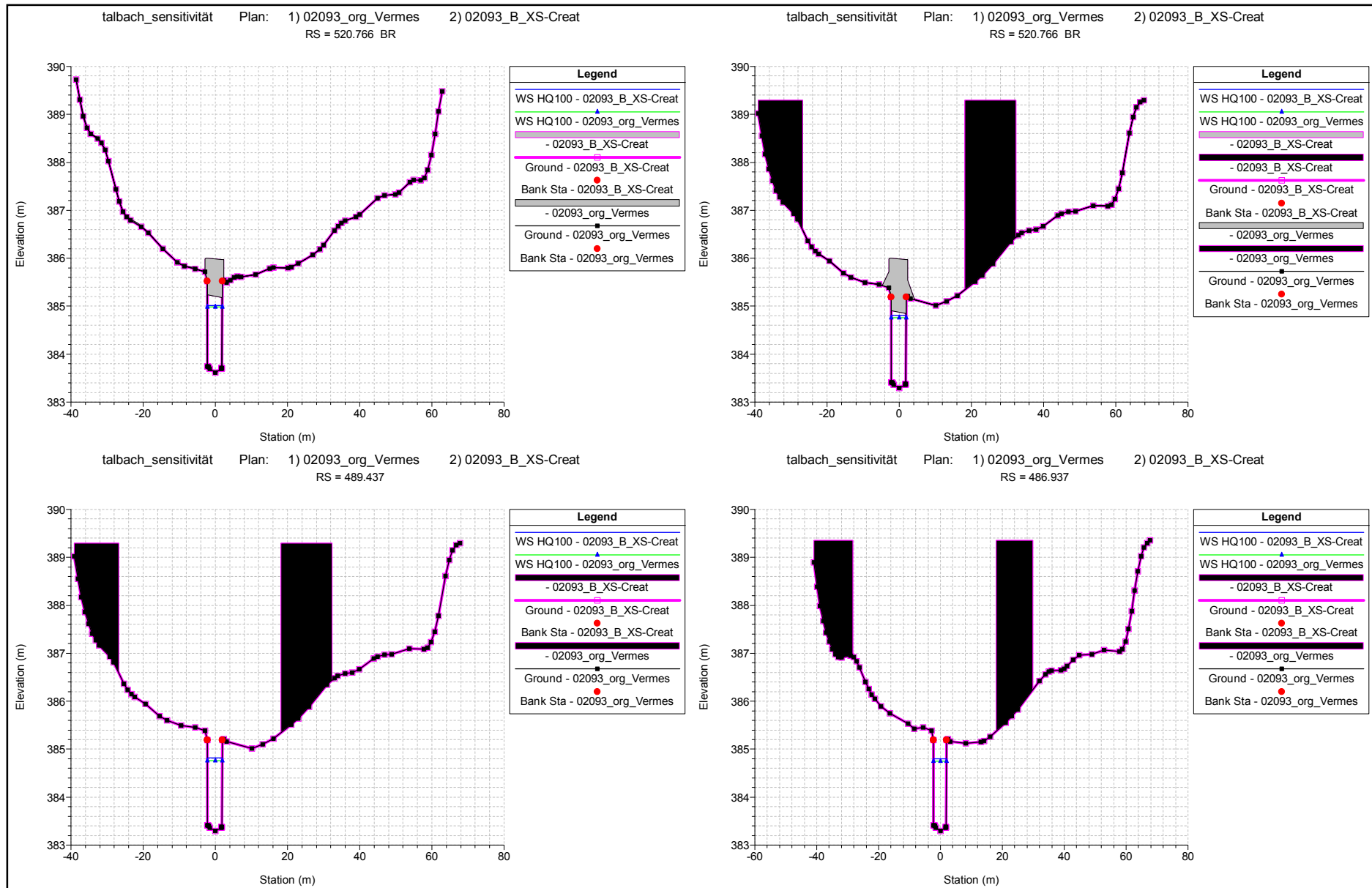
Anlage D.3.5 Talbach: Querprofilgeometrienvergleich Referenzzustand/ Variante B mit Zusatzprofilen durch XS-Creator



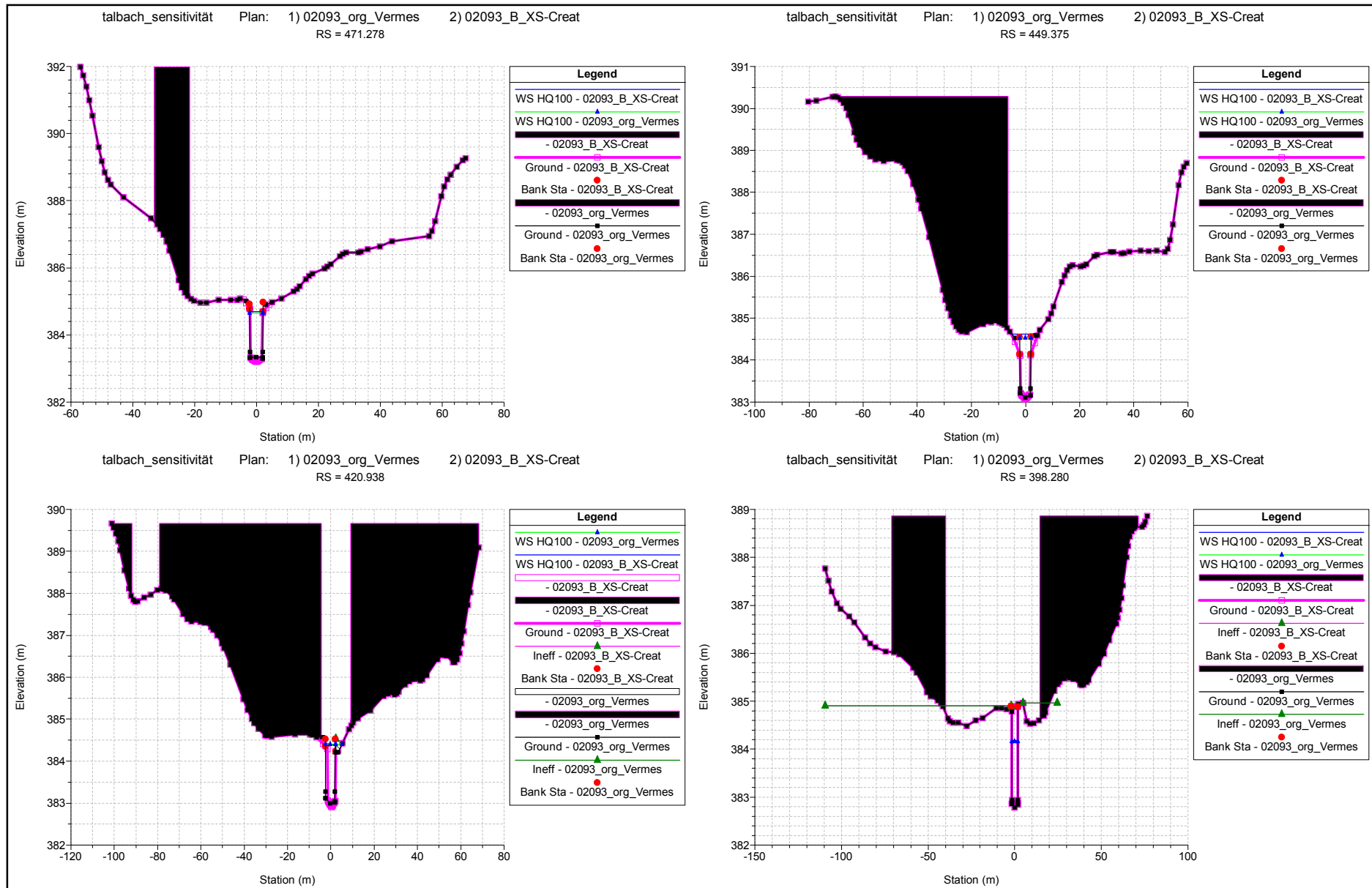
Anlage D.3.5 Talbach: Querprofilgeometrienvergleich Referenzzustand/ Variante B mit Zusatzprofilen durch XS-Creator



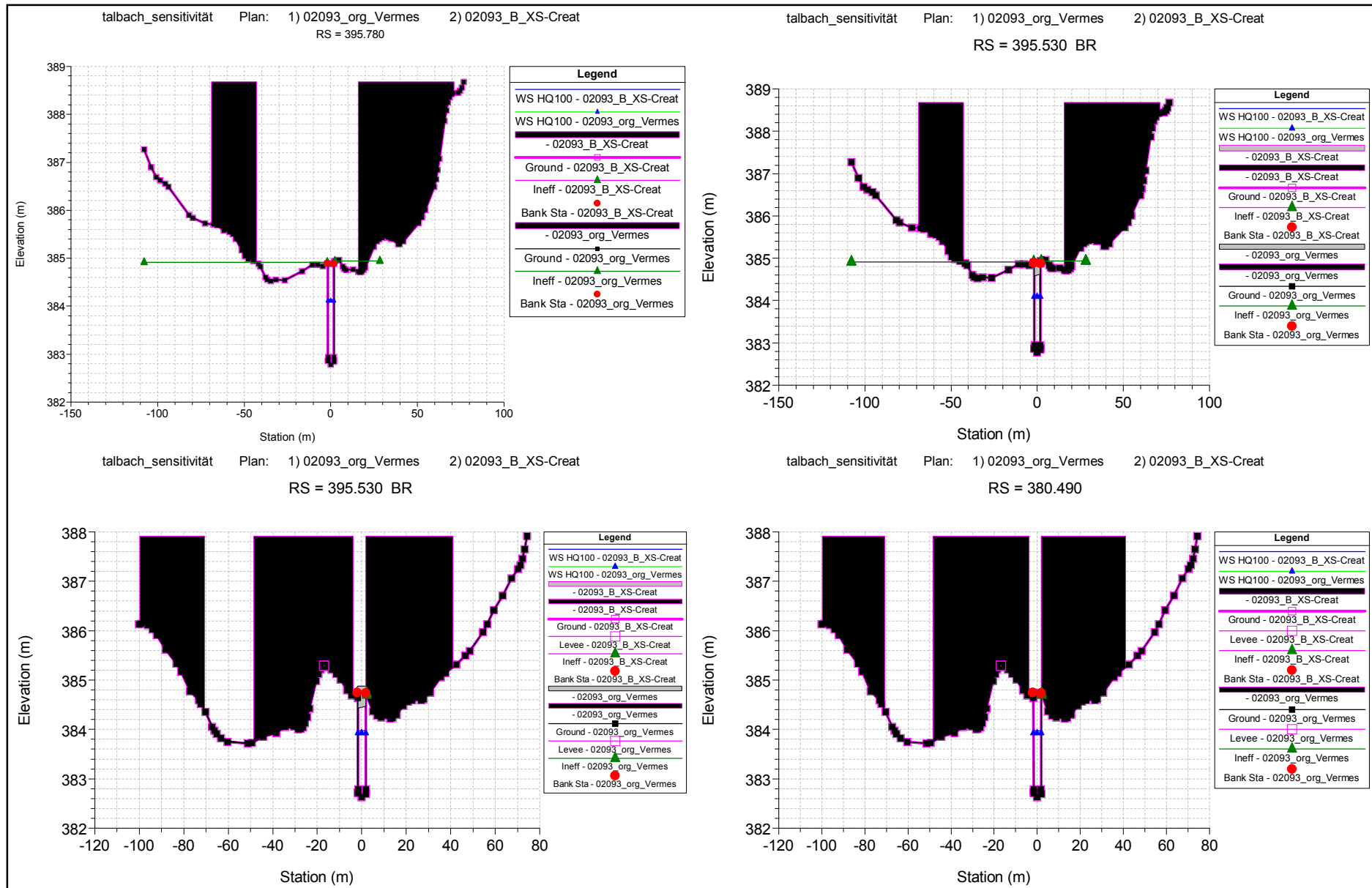
Anlage D.3.5 Talbach: Querprofilgeometrienvergleich Referenzzustand/ Variante B mit Zusatzprofilen durch XS-Creator



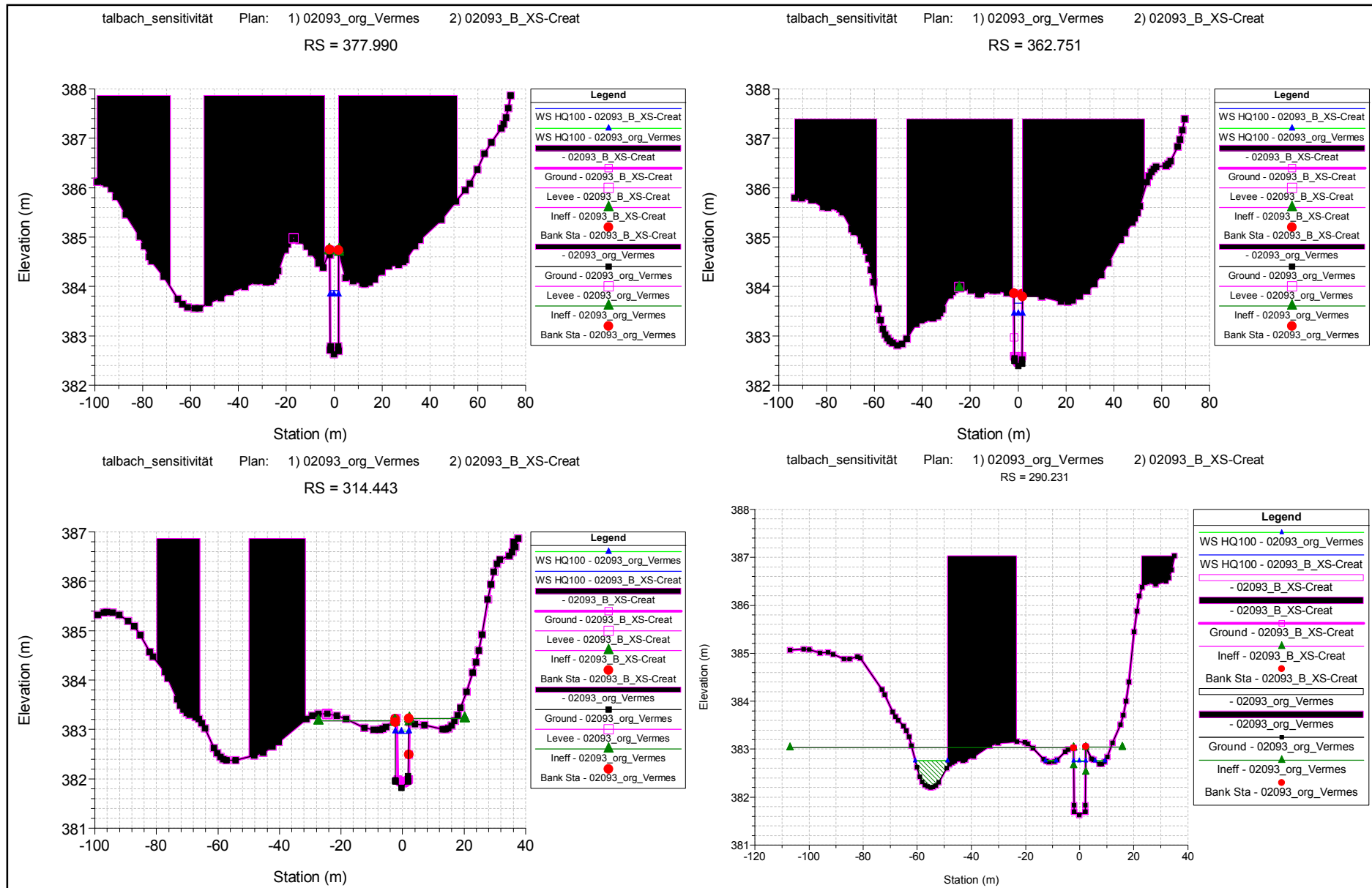
Anlage D.3.5 Talbach: Querprofilgeometrienvergleich Referenzzustand/ Variante B mit Zusatzprofilen durch XS-Creator



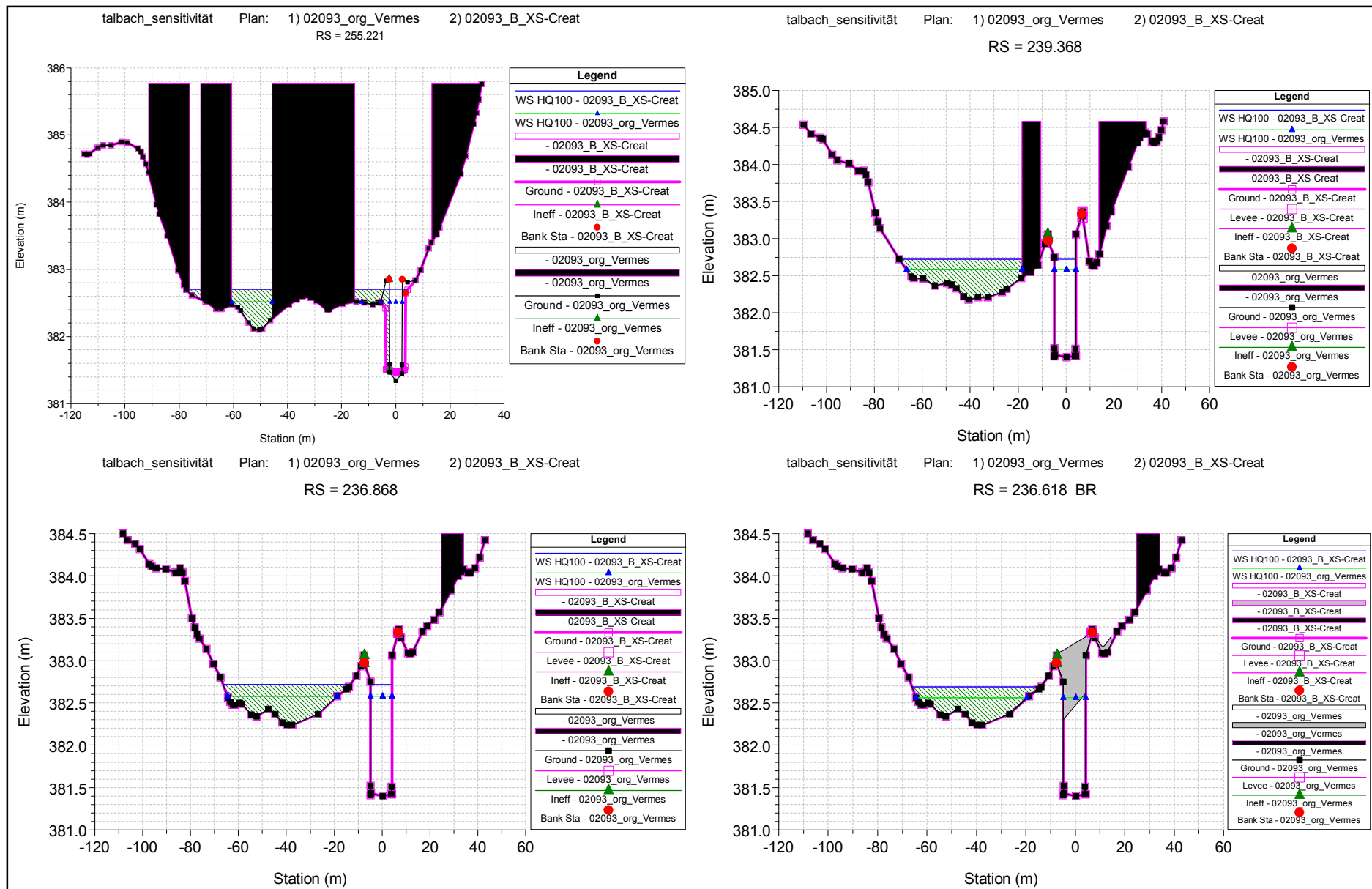
Anlage D.3.5 Talbach: Querprofilgeometrienvergleich Referenzzustand/ Variante B mit Zusatzprofilen durch XS-Creator



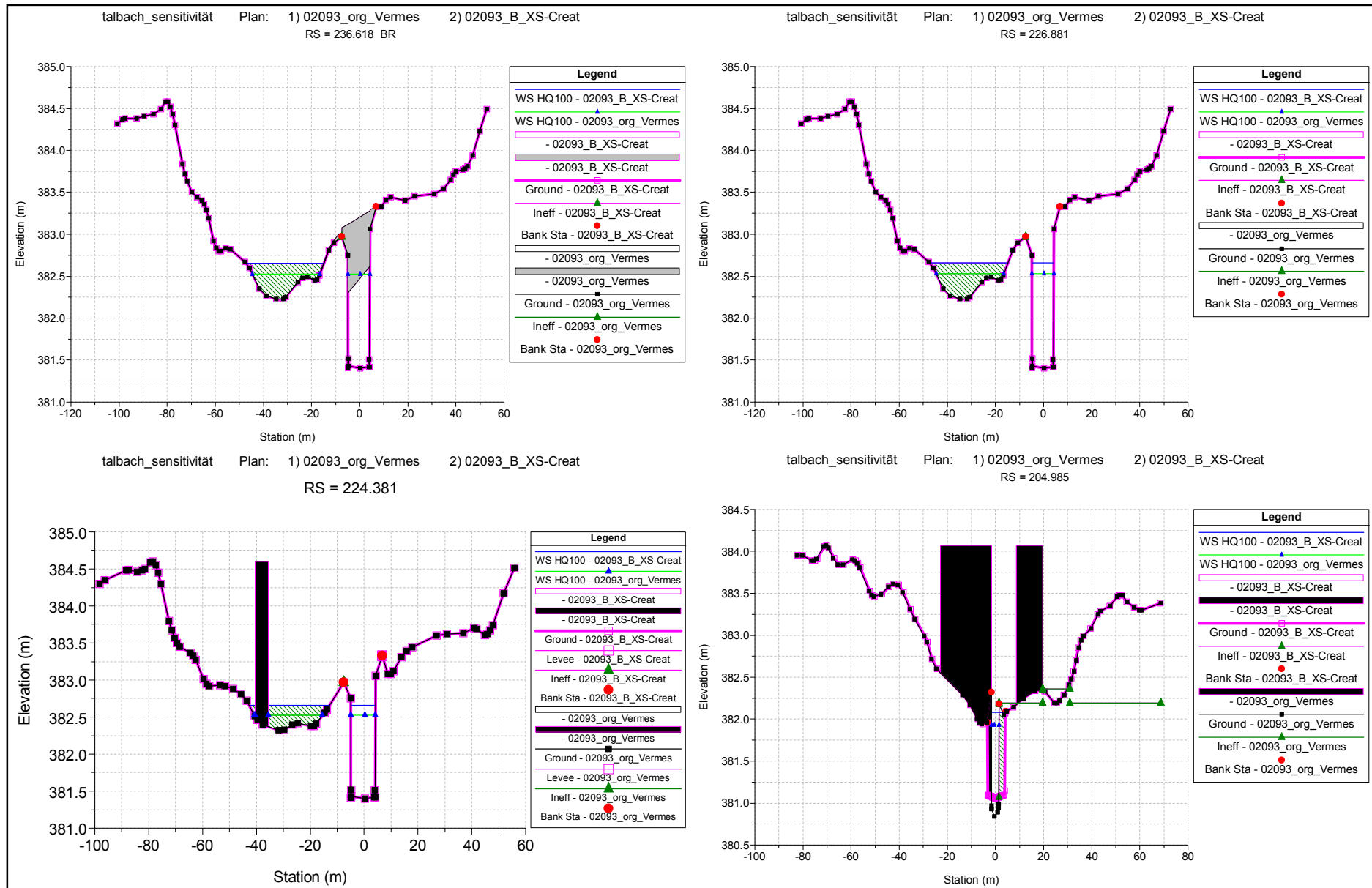
Anlage D.3.5 Talbach: Querprofilgeometrienvergleich Referenzzustand/ Variante B mit Zusatzprofilen durch XS-Creator



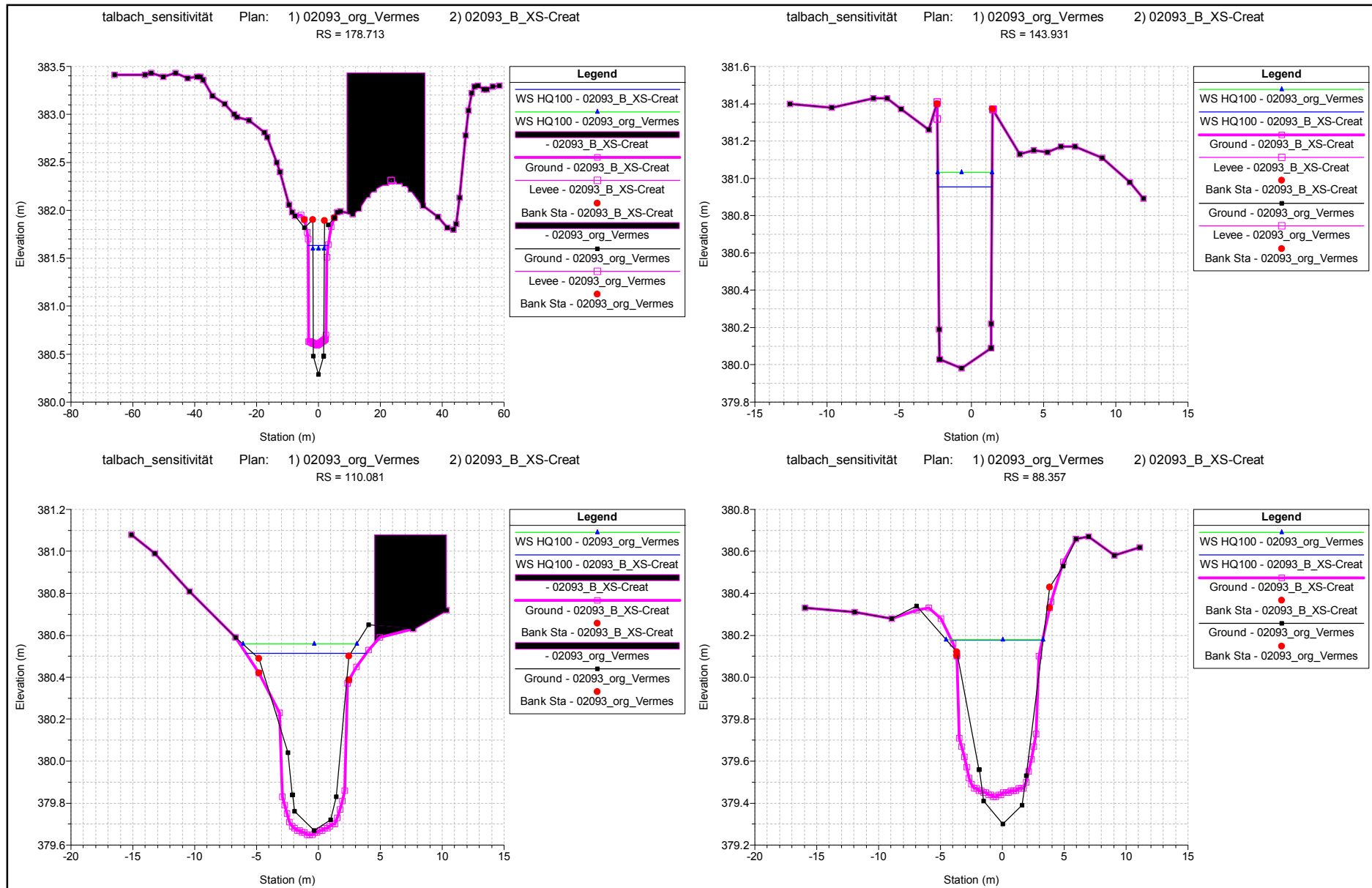
Anlage D.3.5 Talbach: Querprofilgeometrienvergleich Referenzzustand/ Variante B mit Zusatzprofilen durch XS-Creator



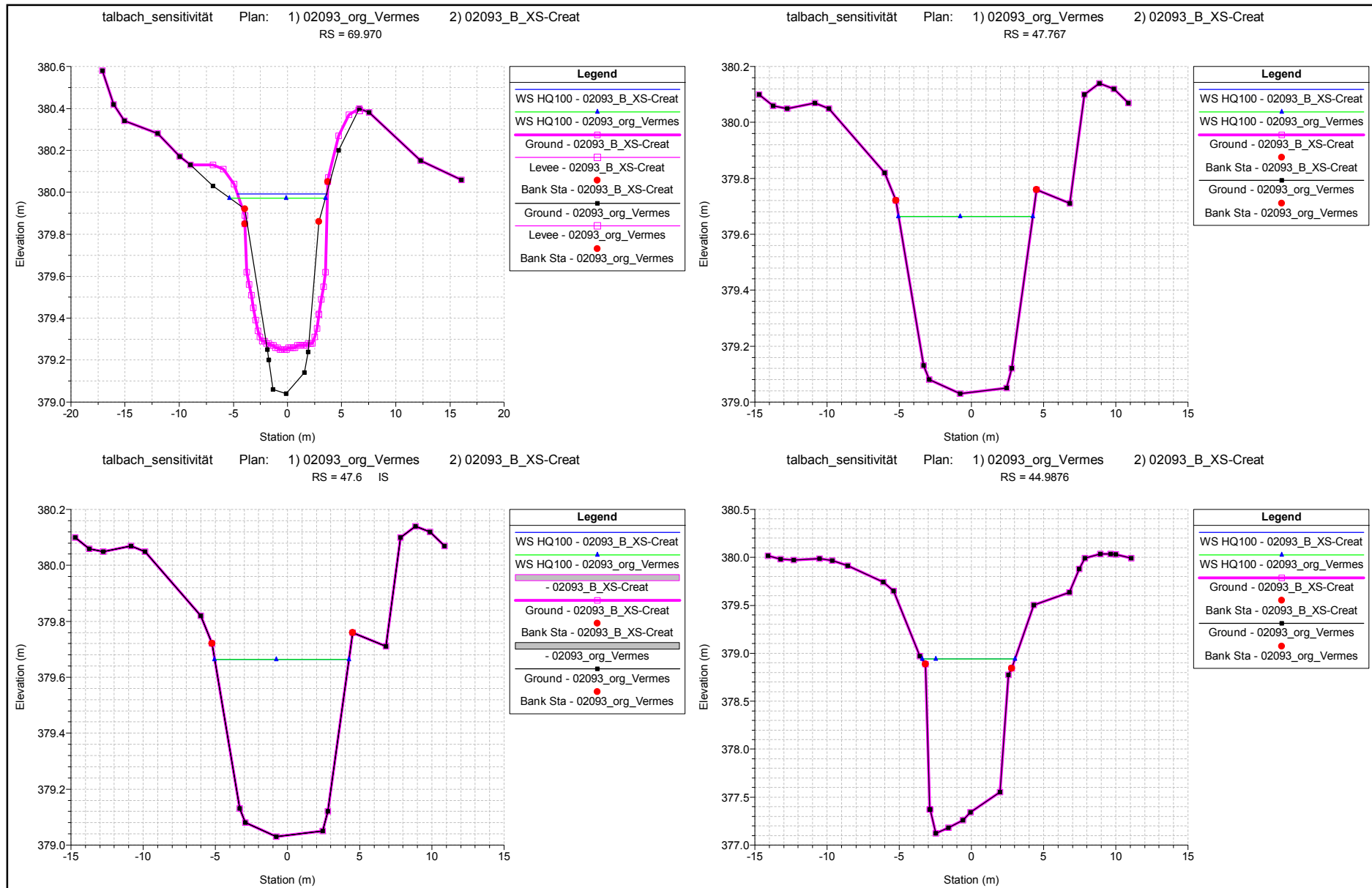
Anlage D.3.5 Talbach: Querprofilgeometrienvergleich Referenzzustand/ Variante B mit Zusatzprofilen durch XS-Creator



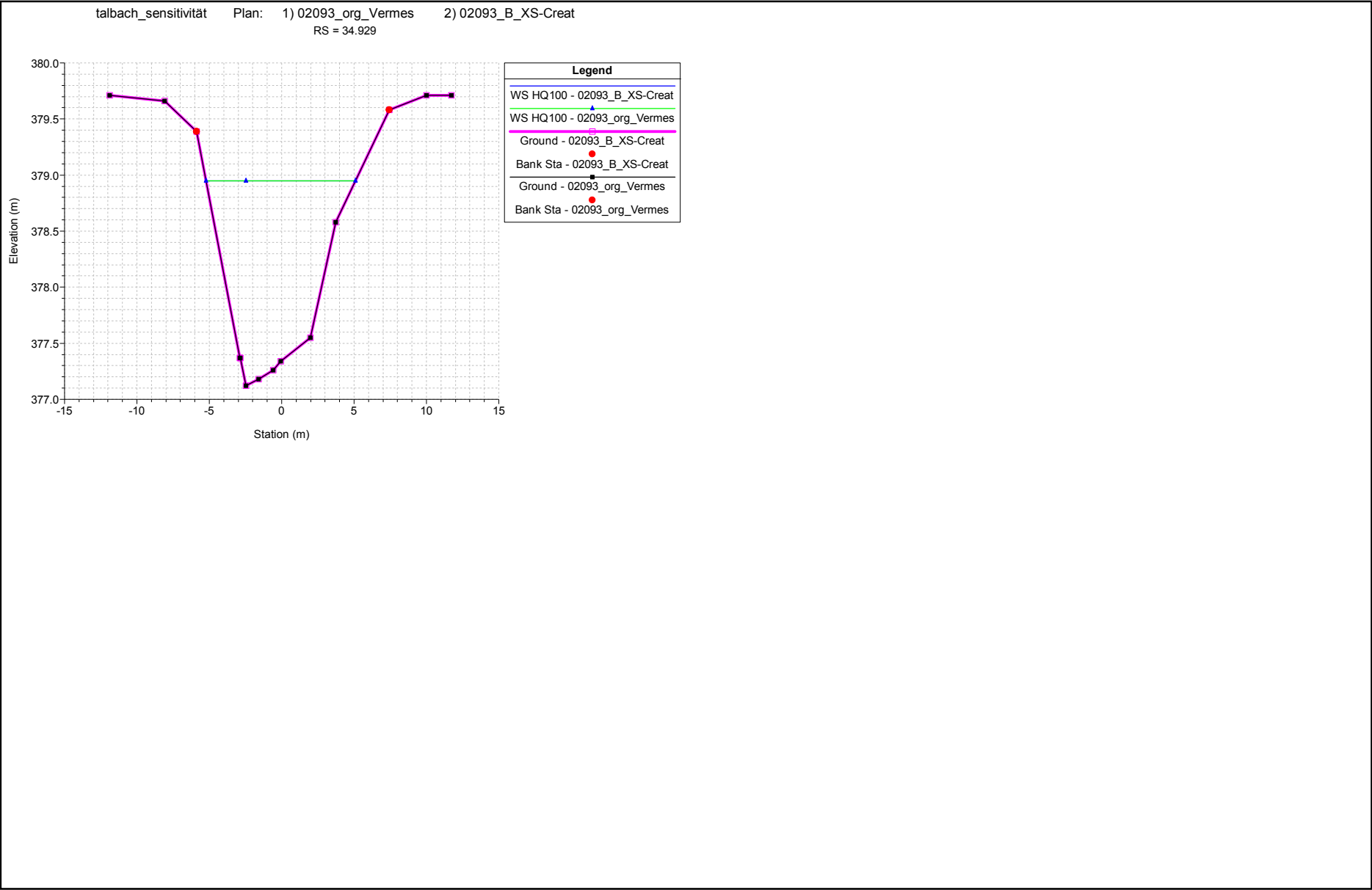
Anlage D.3.5 Talbach: Querprofilgeometrienvergleich Referenzzustand/ Variante B mit Zusatzprofilen durch XS-Creator



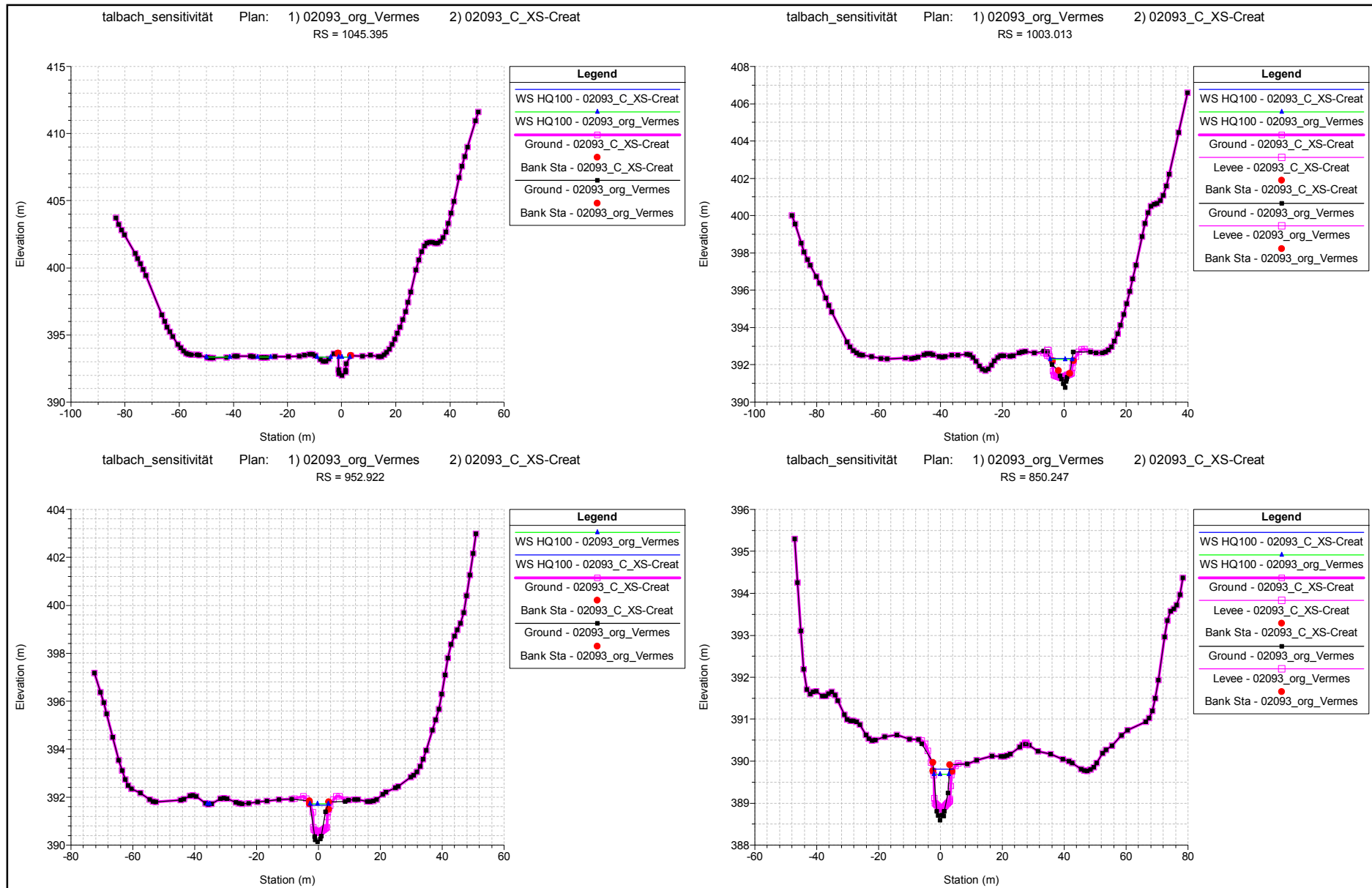
Anlage D.3.5 Talbach: Querprofilgeometrienvergleich Referenzzustand/ Variante B mit Zusatzprofilen durch XS-Creator



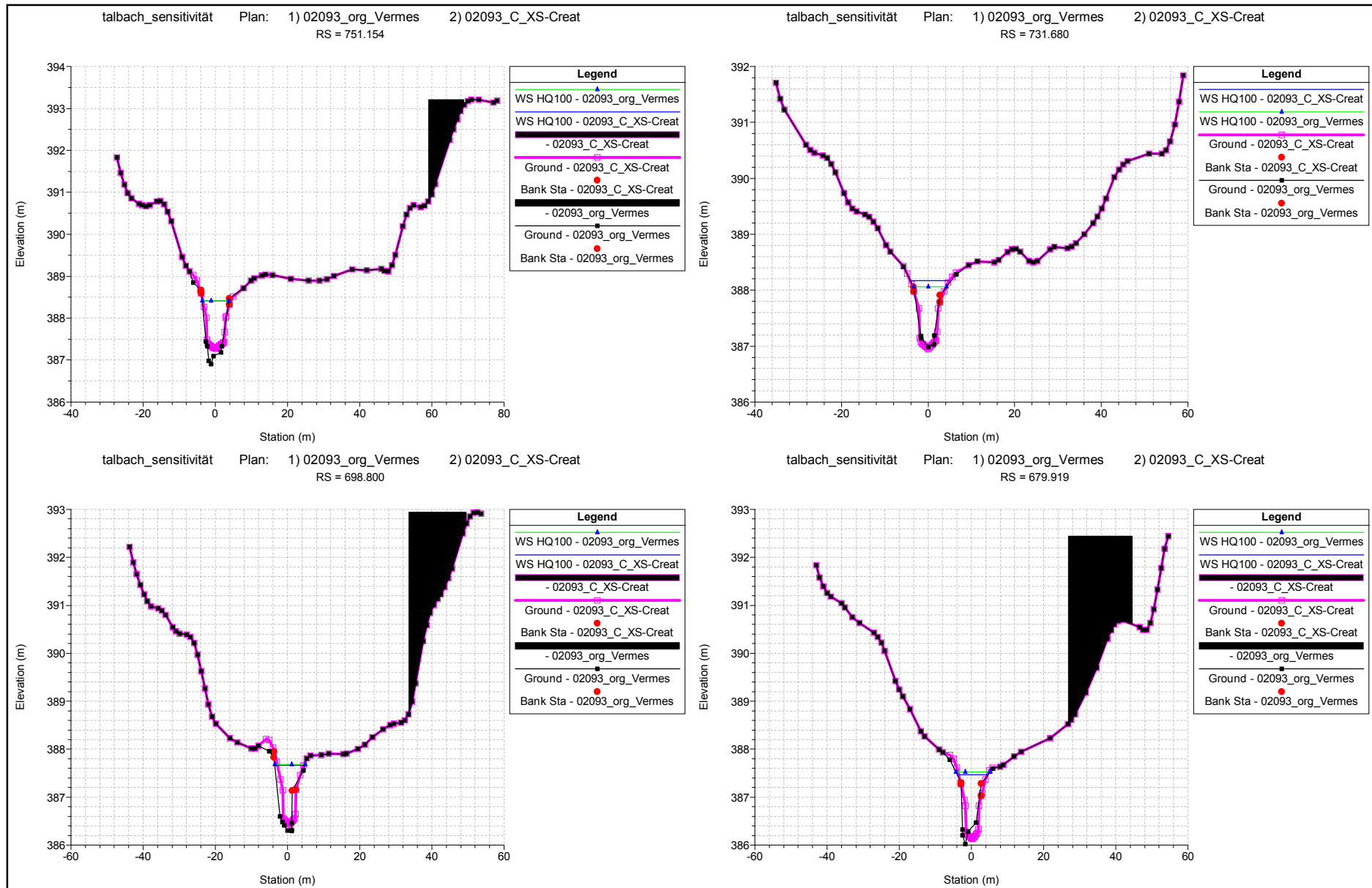
Anlage D.3.5 Talbach: Querprofilgeometrienvergleich Referenzzustand/ Variante B mit Zusatzprofilen durch XS-Creator



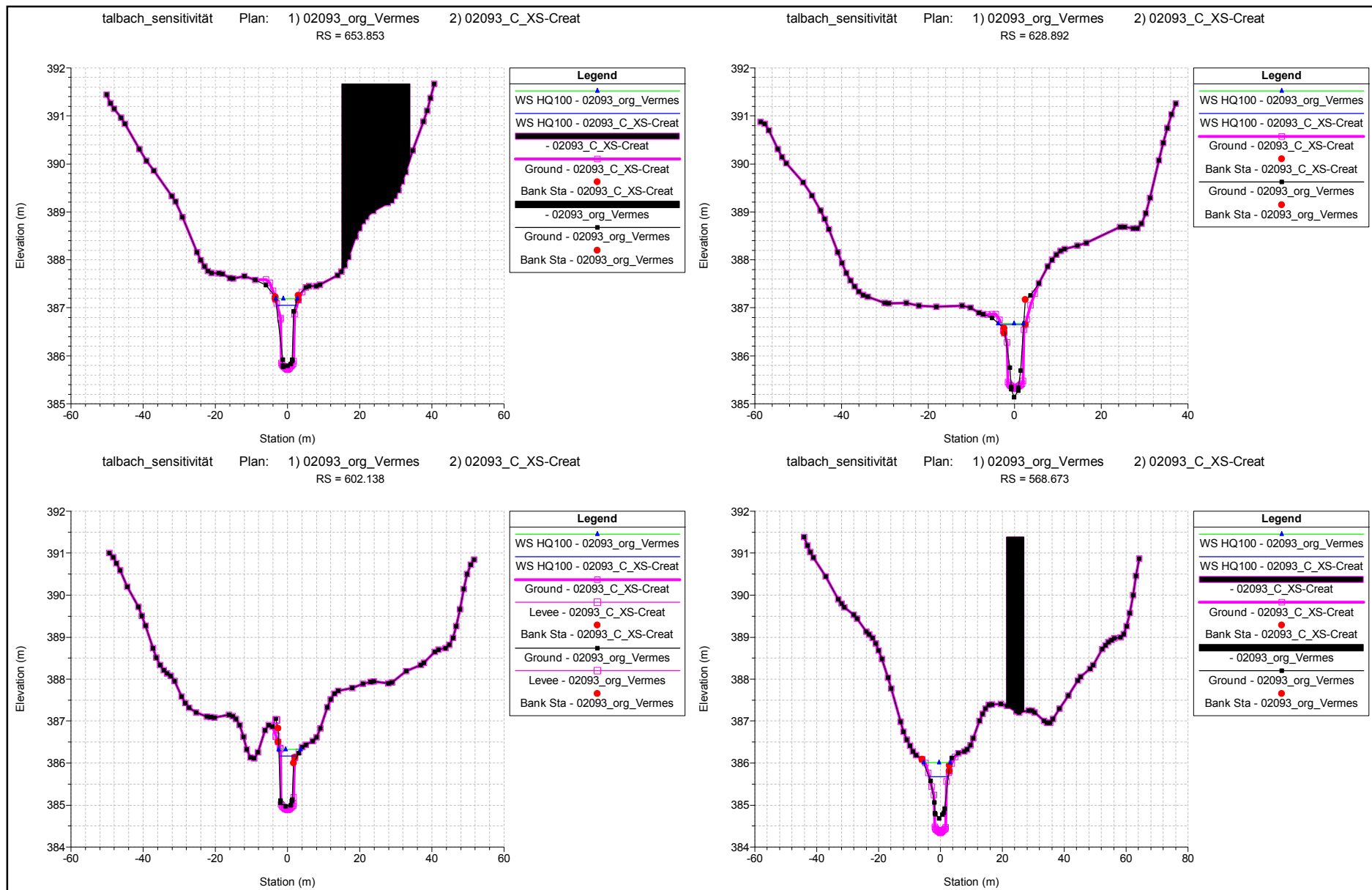
Anlage D.3.6 Talbach: Querprofilgeometrienvergleich Referenzzustand/ Variante C mit Zusatzprofilen durch XS-Creator



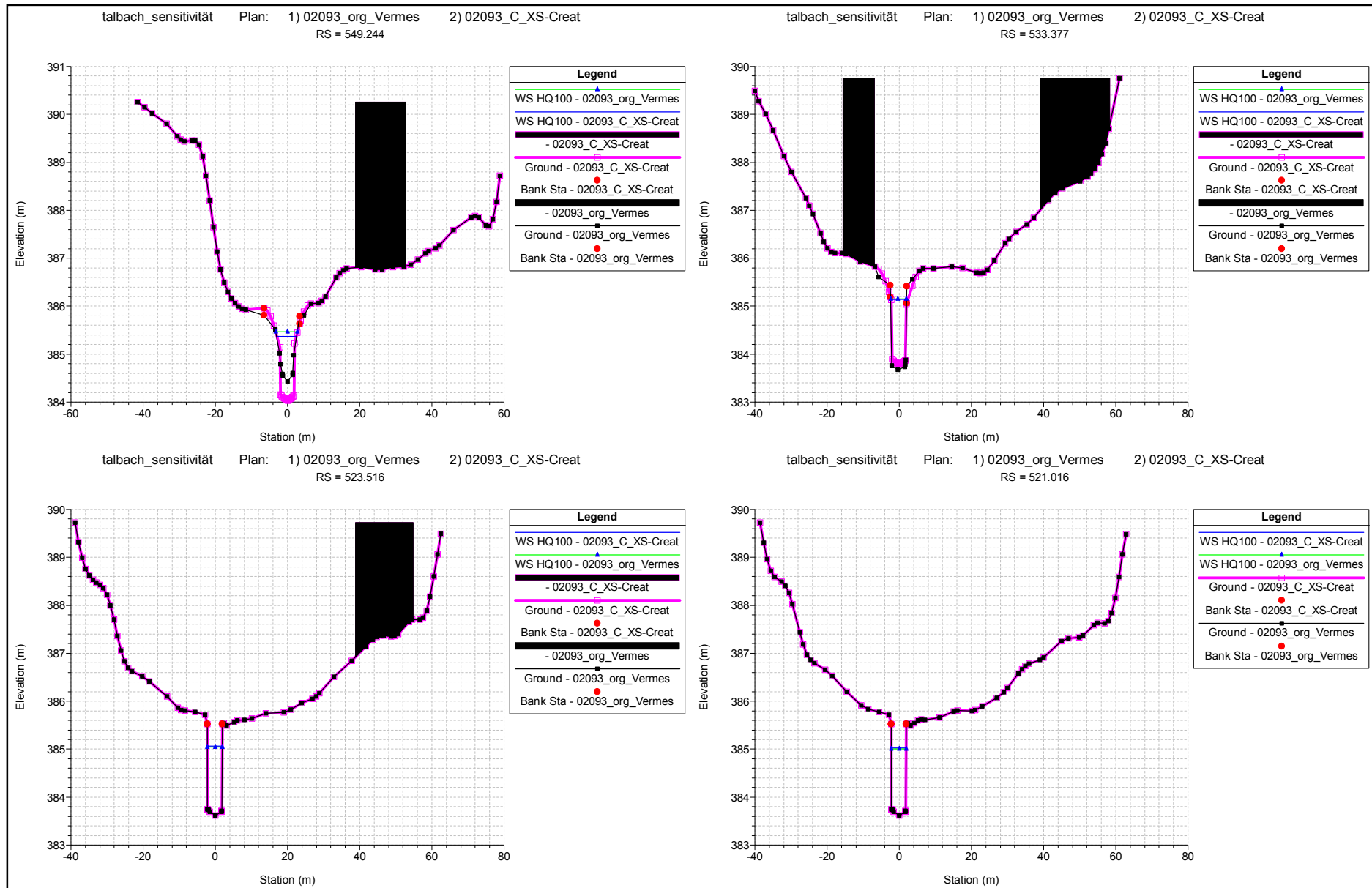
Anlage D.3.6 Talbach: Querprofilgeometrienvergleich Referenzzustand/ Variante C mit Zusatzprofilen durch XS-Creator



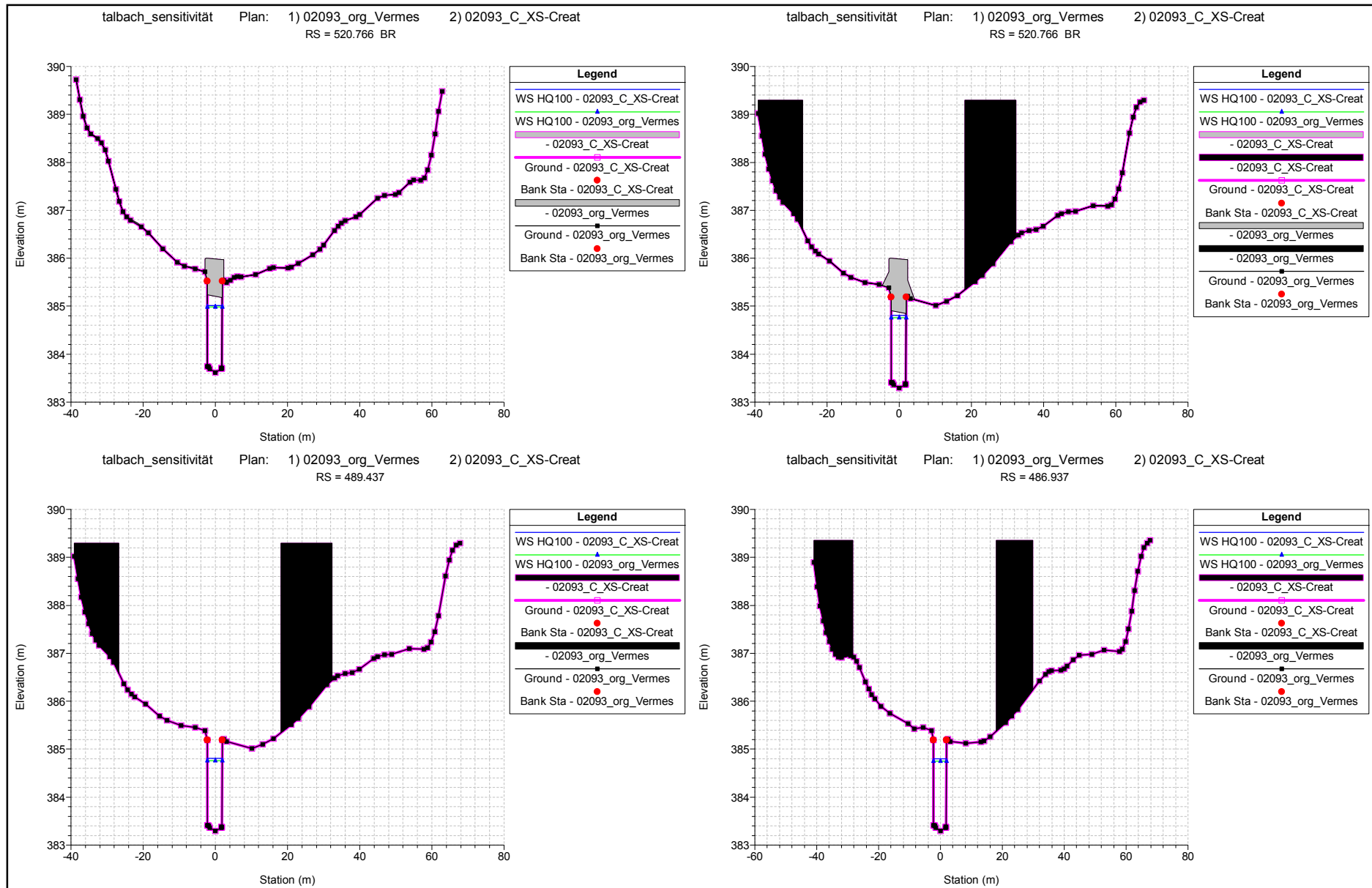
Anlage D.3.6 Talbach: Querprofilgeometrienvergleich Referenzzustand/ Variante C mit Zusatzprofilen durch XS-Creator



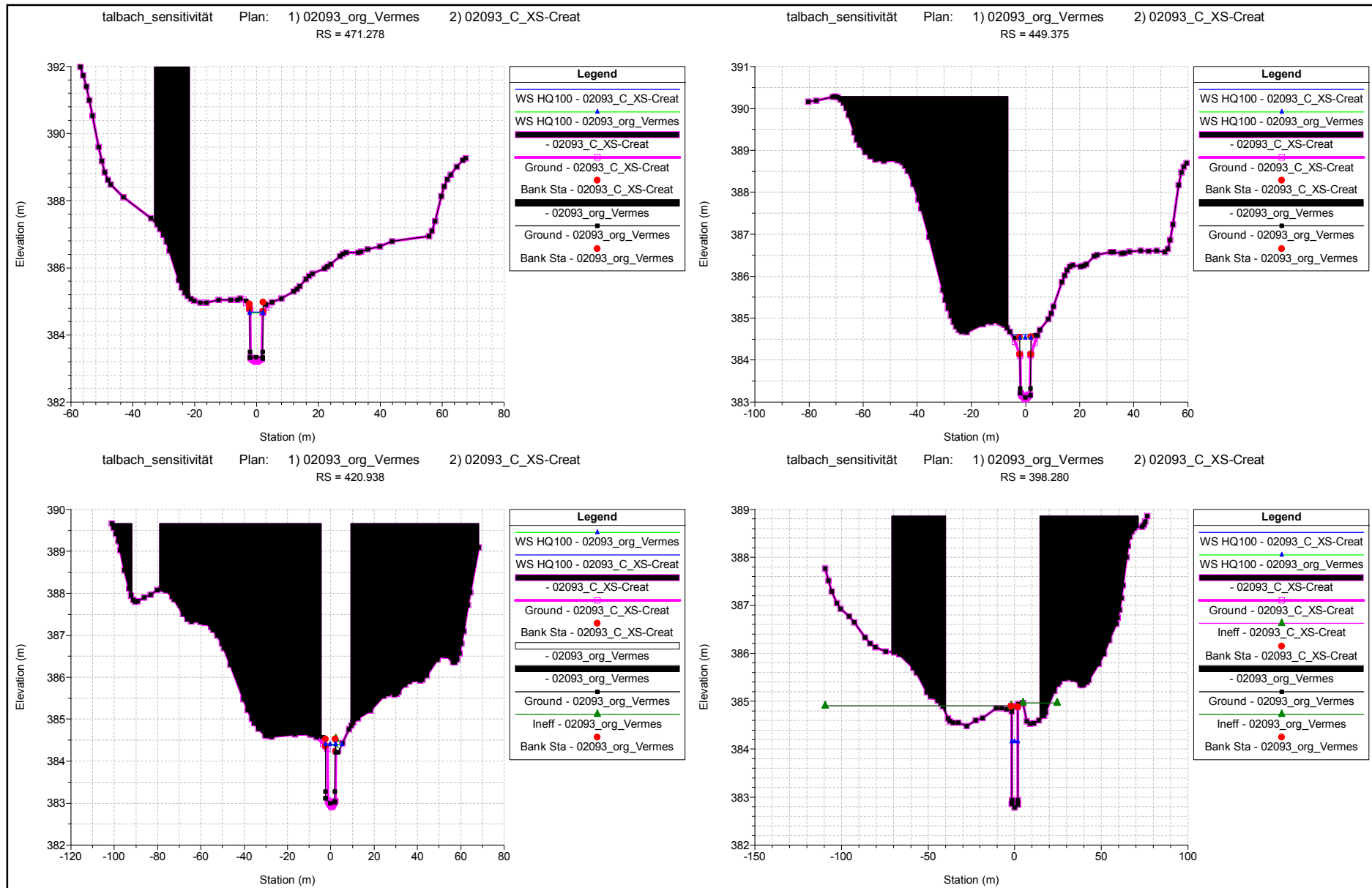
Anlage D.3.6 Talbach: Querprofilgeometrienvergleich Referenzzustand/ Variante C mit Zusatzprofilen durch XS-Creator



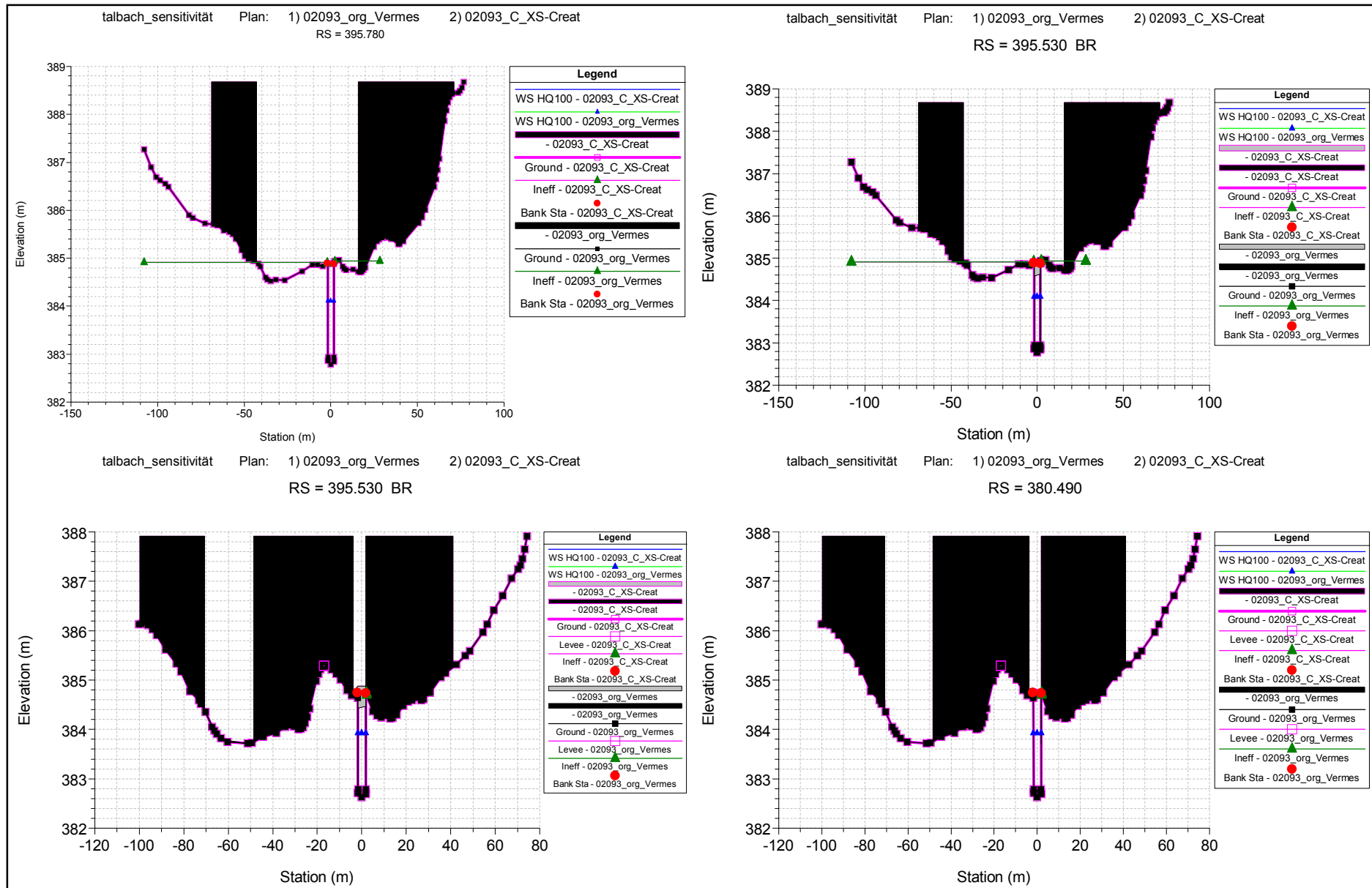
Anlage D.3.6 Talbach: Querprofilgeometrienvergleich Referenzzustand/ Variante C mit Zusatzprofilen durch XS-Creator



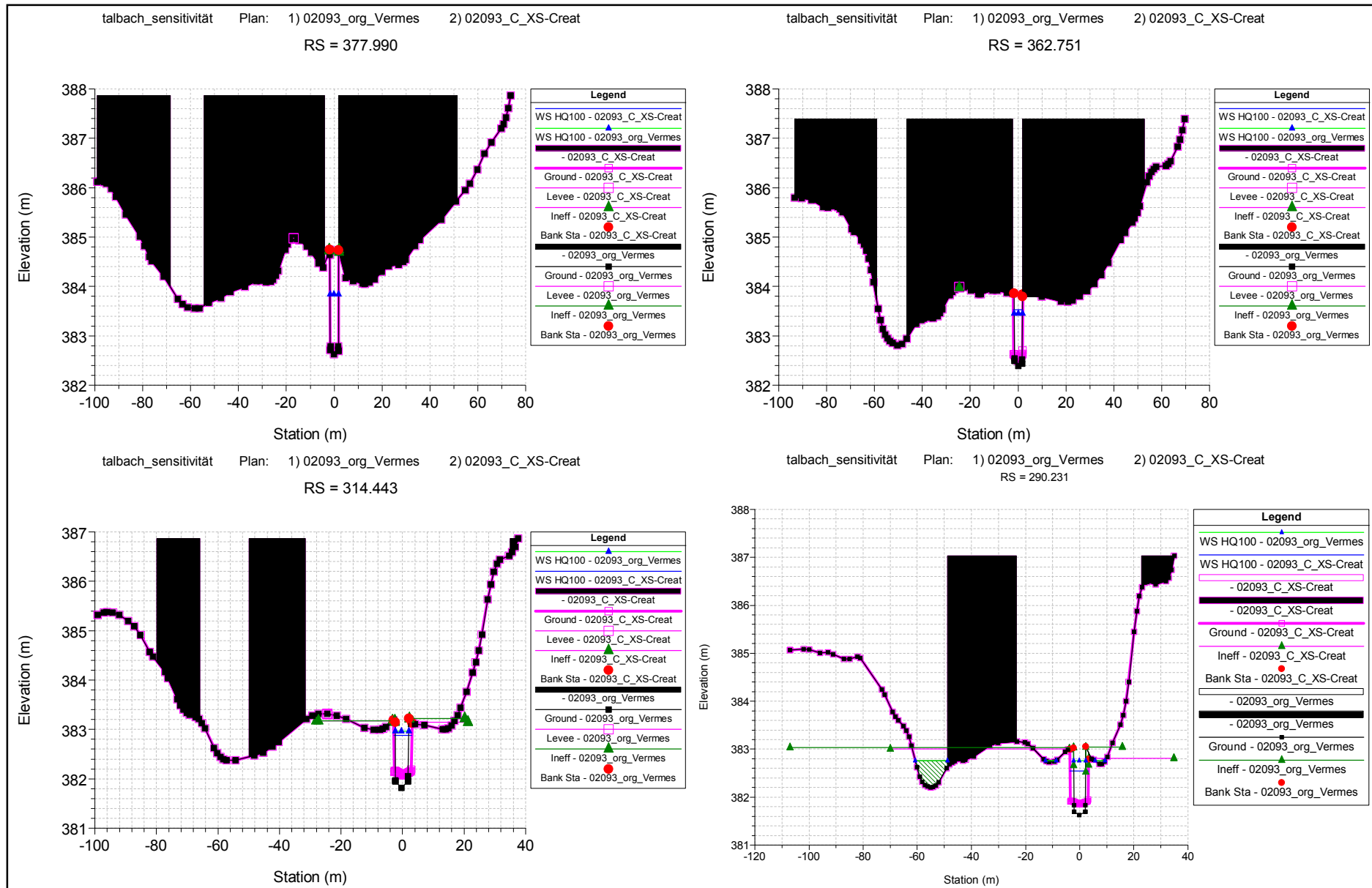
Anlage D.3.6 Talbach: Querprofilgeometrienvergleich Referenzzustand/ Variante C mit Zusatzprofilen durch XS-Creator



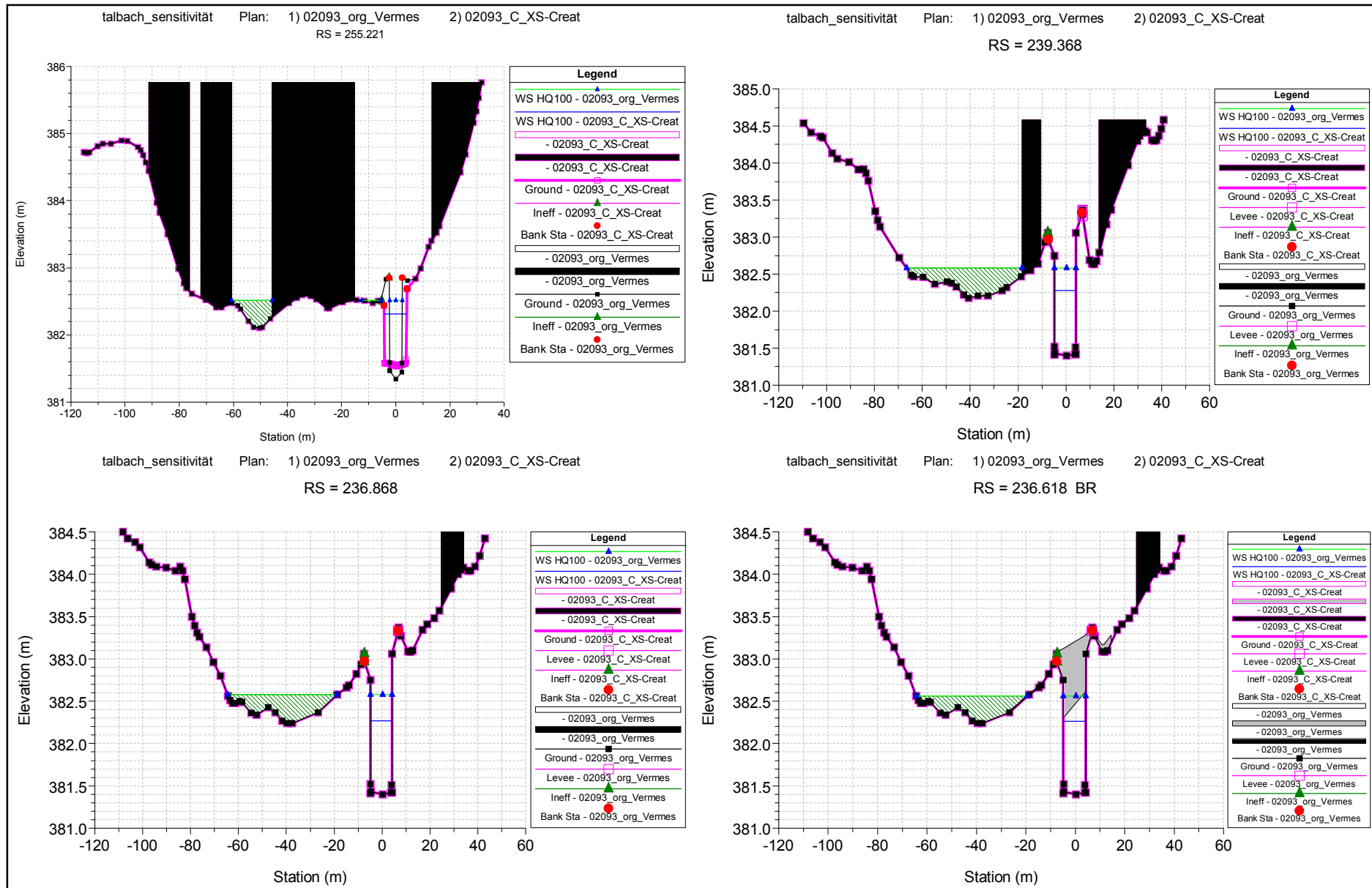
Anlage D.3.6 Talbach: Querprofilgeometrienvergleich Referenzzustand/ Variante C mit Zusatzprofilen durch XS-Creator



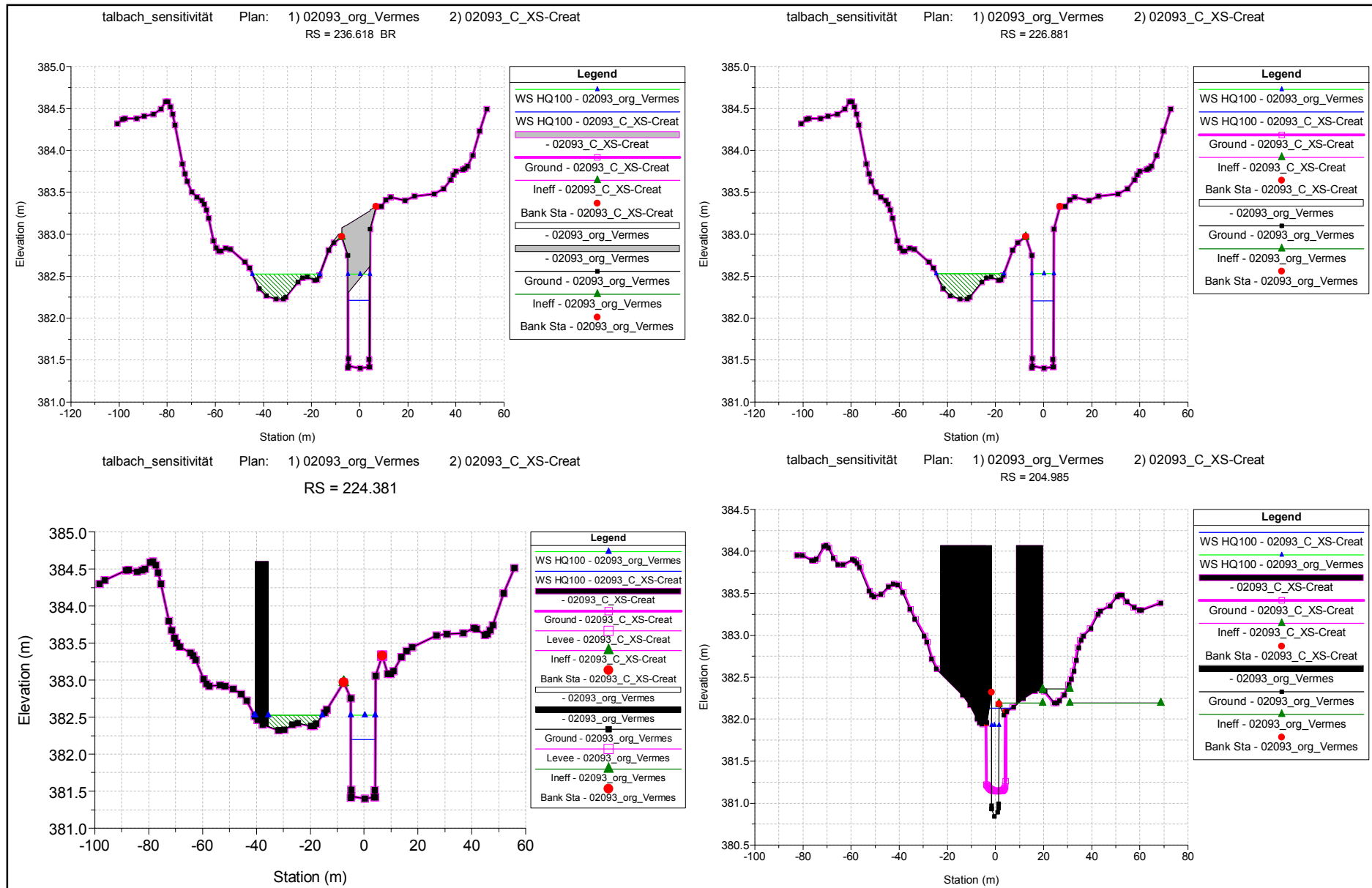
Anlage D.3.6 Talbach: Querprofilgeometrienvergleich Referenzzustand/ Variante C mit Zusatzprofilen durch XS-Creator



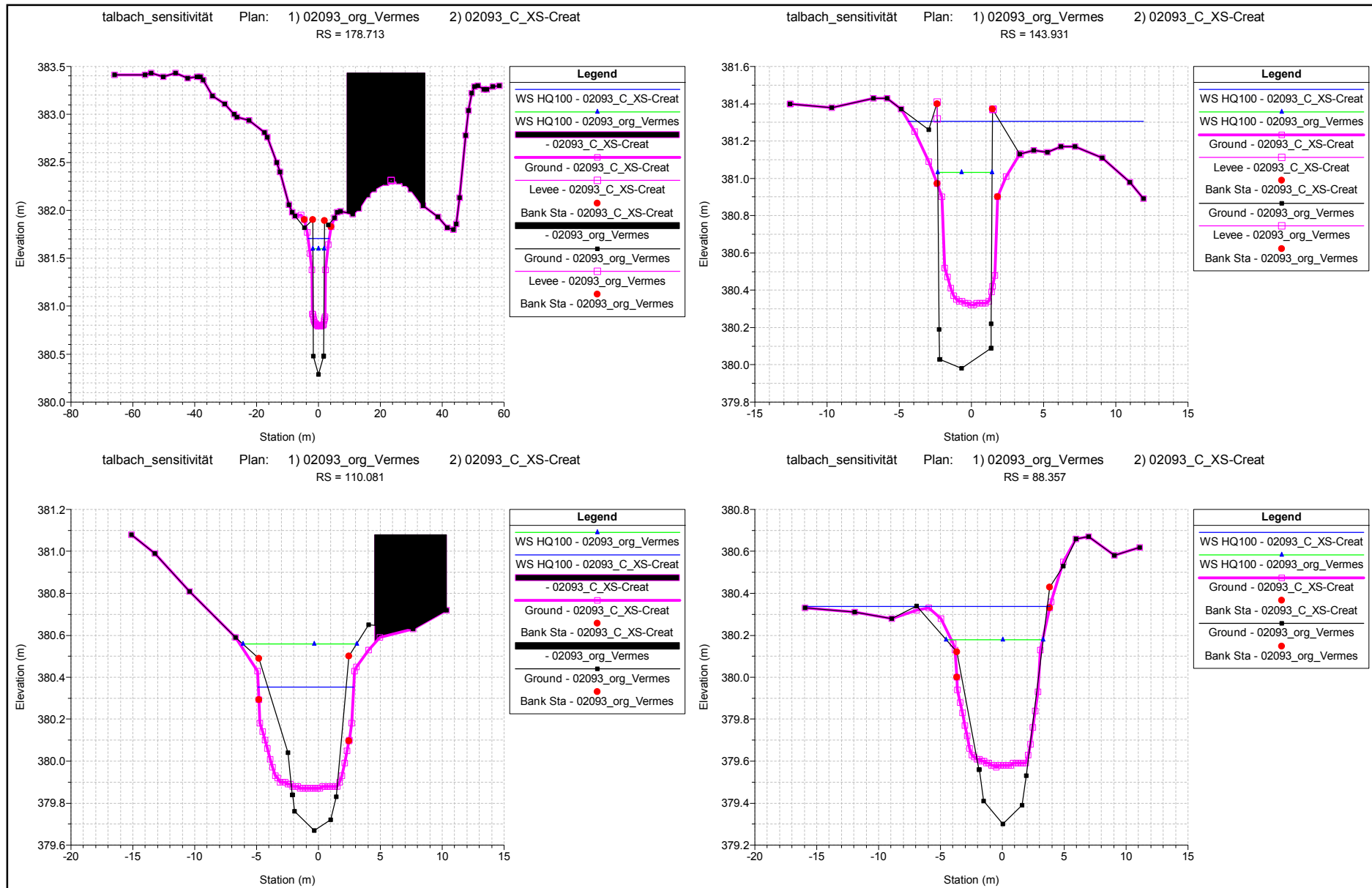
Anlage D.3.6 Talbach: Querprofilgeometrienvergleich Referenzzustand/ Variante C mit Zusatzprofilen durch XS-Creator



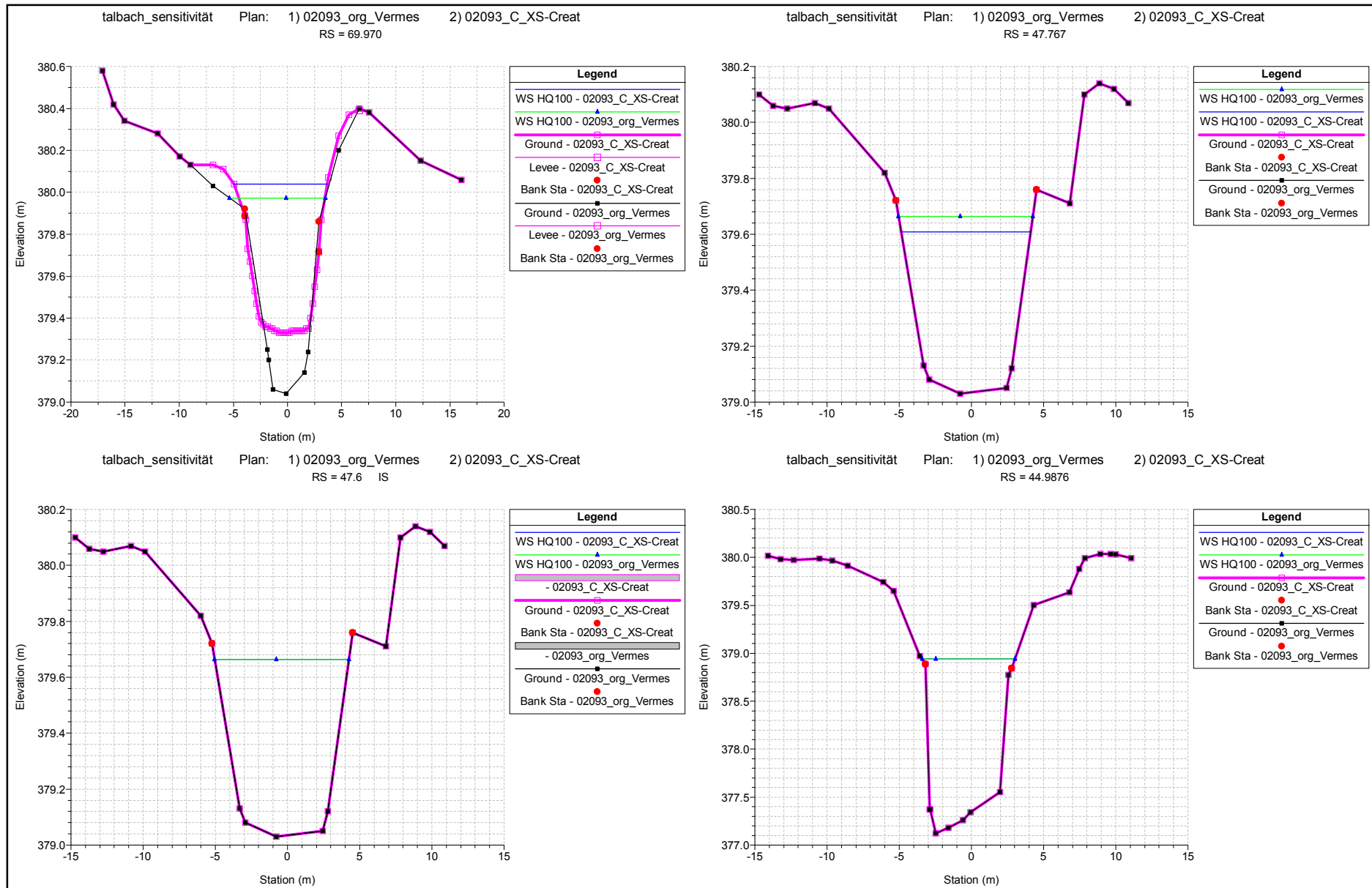
Anlage D.3.6 Talbach: Querprofilgeometrienvergleich Referenzzustand/ Variante C mit Zusatzprofilen durch XS-Creator



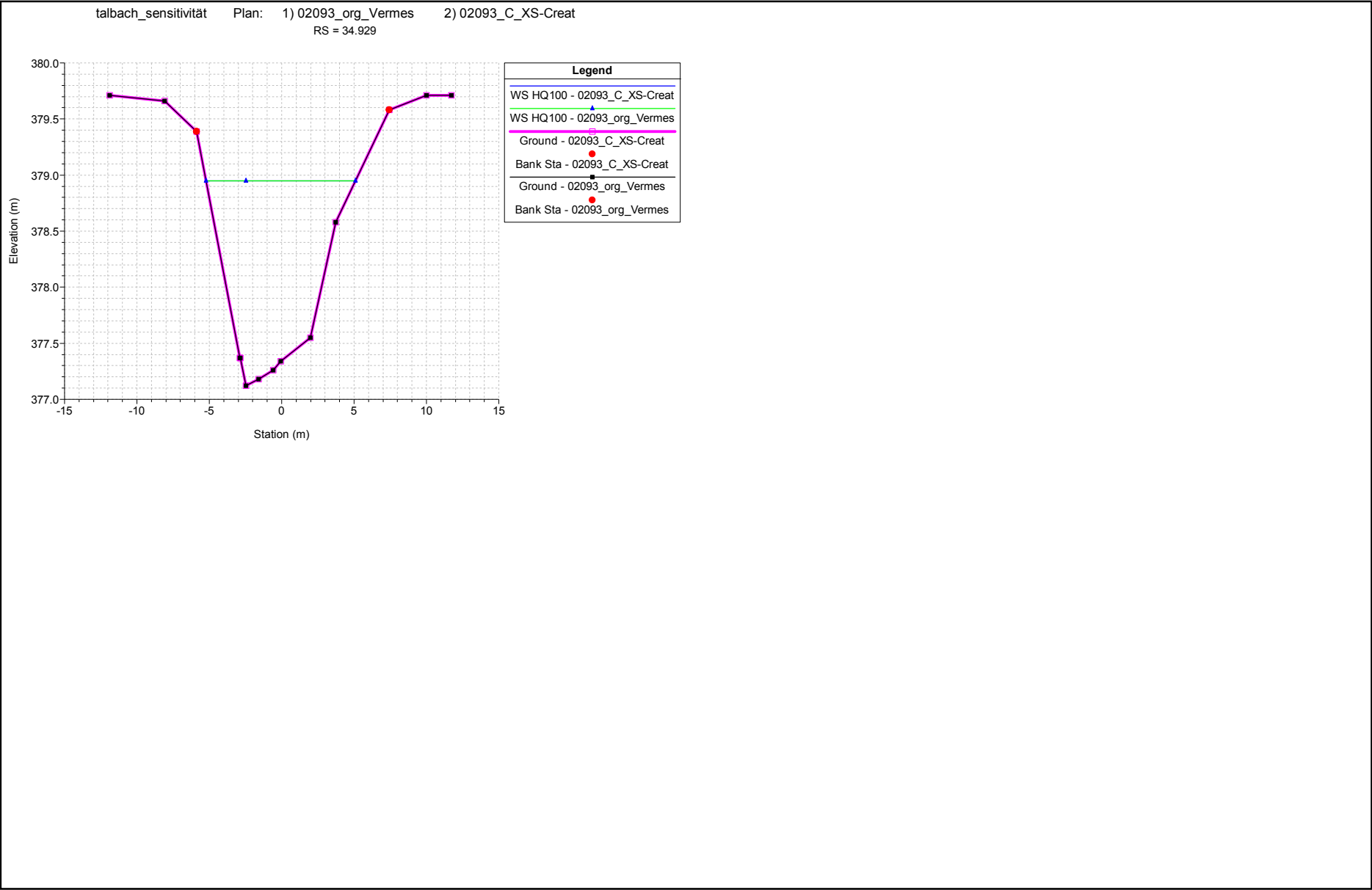
Anlage D.3.6 Talbach: Querprofilgeometrienvergleich Referenzzustand/ Variante C mit Zusatzprofilen durch XS-Creator



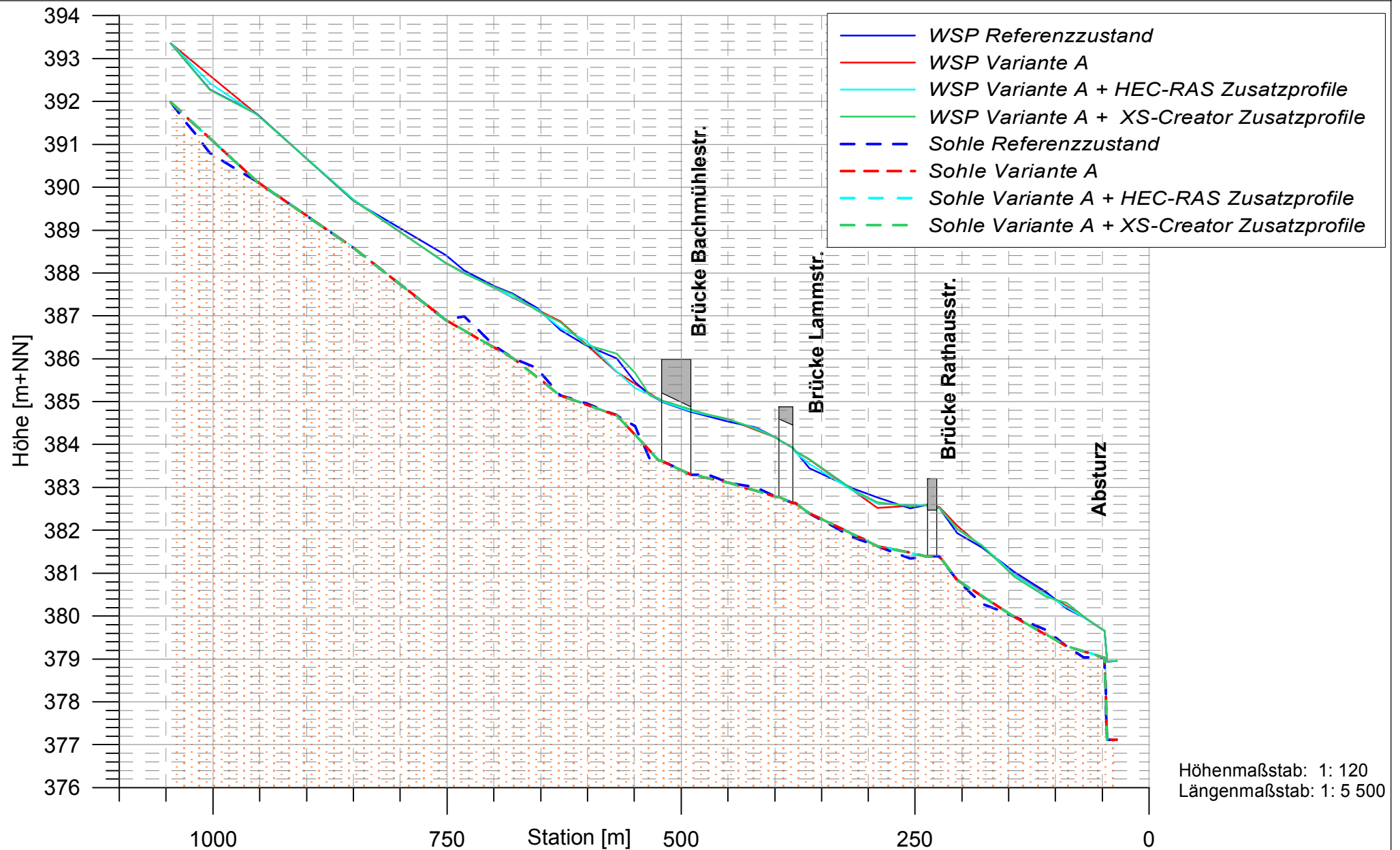
Anlage D.3.6 Talbach: Querprofilgeometrienvergleich Referenzzustand/ Variante C mit Zusatzprofilen durch XS-Creator



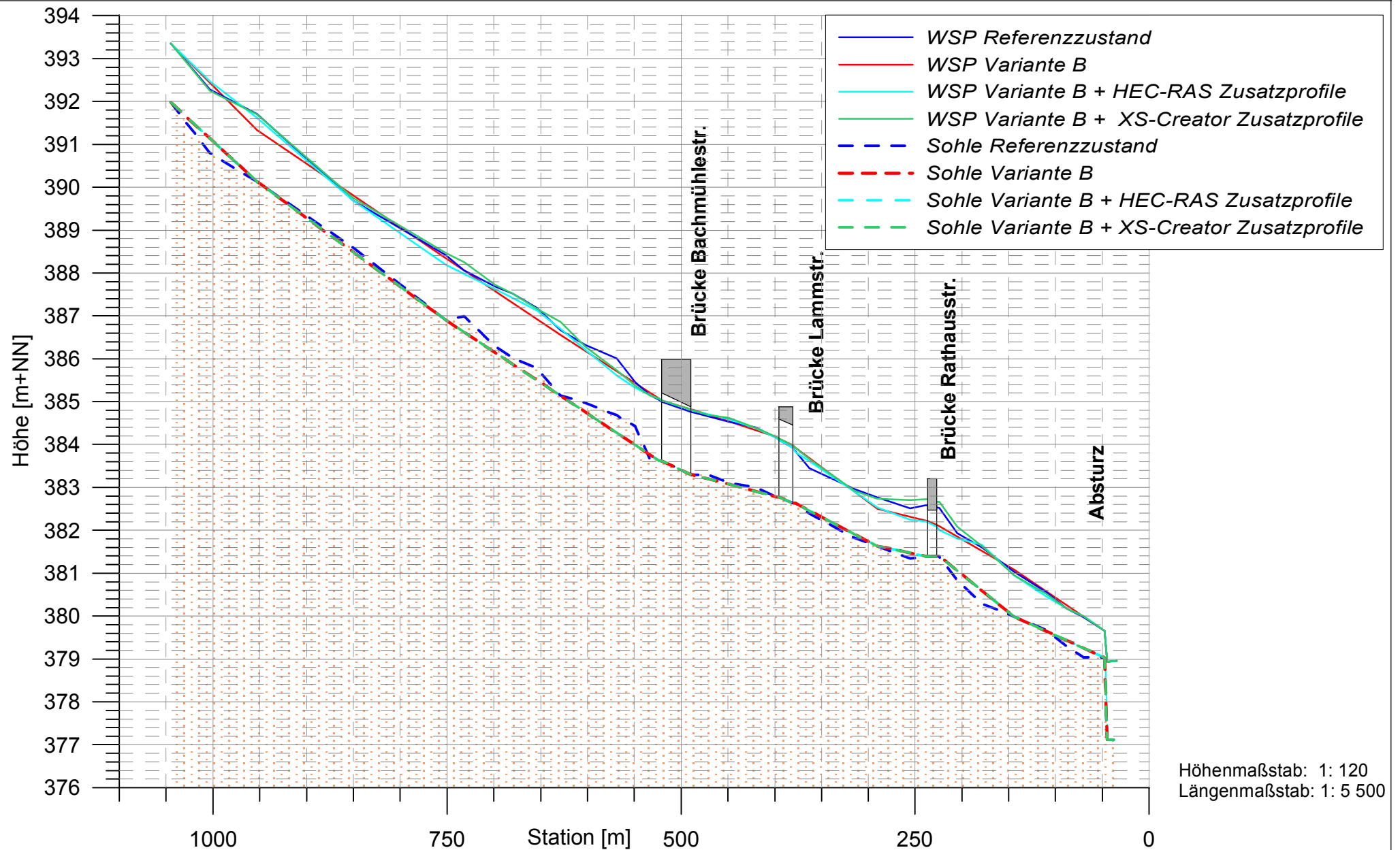
Anlage D.3.6 Talbach: Querprofilgeometrienvergleich Referenzzustand/ Variante C mit Zusatzprofilen durch XS-Creator



Anlage D.3.7 Talbach: Wasserspiegellängsschnitt für Variante A



Anlage D.3.8 Talbach: Wasserspiegellängsschnitt für Variante B



Anlage D.3.9 : Talbach: Wasserspiegellängsschnitt für Variante C

